

Theoretische und experimentelle
Untersuchungen
zum Problem des Seitenastes in einer
hydrodynamischen Wellenleitung

von
Rudolf Dietrich Bauer
aus Trumsdorf

Erlangen, 1976

Theoretische und experimentelle
Untersuchungen
zum Problem des Seitenastes in einer
hydrodynamischen Wellenleitung

Den Naturwissenschaftlichen Fachbereichen
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades

vorgelegt von
Rudolf Dietrich Bauer
aus Trumsdorf

Erlangen, 1976

Als Dissertation genehmigt von den
Naturwissenschaftlichen Fachbereichen
der Universität Erlangen-Nürnberg



Tag der mündlichen Prüfung: 26.2.1976

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof.Dr.H.Remmert
Erstberichterstatter: Prof.Dr.M.Schaldach
Zweitberichterstatter: Prof.Dr.E.Wetterer
Drittberichterstatter: Prof.Dr.K.-F.Ebert

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen und Methodik	3
2.1. Theorie der Wellenleitung	4
2.1.1. Wellengleichung	5
2.1.2. Wellenwiderstand, Eingangswiderstand	9
2.1.3. Reflexionsfaktor, reflektierte Wellen, peripherer Widerstand	13
2.2. Theoretisches Schlauchmodell	17
2.3. Physisches Schlauchmodell mit Seitenast, Meßmethoden	27
3. Berechnungen am theoretischen Modell	32
3.1. Reflexionsfaktoren an der Abzweigung	32
3.2. Rückwirkungen des Seitenastes auf die Pulse im Hauptstamm	36
4. Registrierungen im Arteriensystem und im Schlauch- modell mit Seitenast	47
4.1. Pulsregistrierungen im Arteriensystem	47
4.2. Pulsregistrierungen im Schlauchmodell mit Seitenast	51
4.2.1. Reflexionsfaktoren an der Abzweigung	51
4.2.2. Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit vom Winkel der Abzweigung	55
5. Zusammenfassung	58
 Anhang: FORTRAN-Programm zur Berechnung eines Druck- oder Strompulses in einem Schlauchmodell mit Seitenast	 I
Abkürzungen und Symbole	IX
Literatur	XI



Digitized by the Internet Archive
in 2026

1. Einleitung

Das Arteriensystem stellt ein sich in distaler Richtung aufzweigendes System von viskoelastischen Schläuchen dar. Durch den intermittierenden Auswurf des Blutes aus dem Herzen in die Aorta ascendens entstehen Pulse, die sich in diesem Gefäßbaum fortpflanzen. Die Untersuchung dieser Pulse ist seit langem eine der Hauptaufgaben der Hämodynamik. So existieren zahlreiche Arbeiten über Pulse in homogenen und inhomogenen unverzweigten Schläuchen, die ein prinzipielles Verständnis der Verhältnisse im Arteriensystem ermöglichen (Übersichten bei McDONALD (1960/74), WETTERER und KENNER (1968) und bei NOORDERGRAAF (1969)). Da es sich beim Arteriensystem um ein verzweigtes Schlauchsystem handelt, ist auch schon des öfteren das Problem eines Seitenastes und sein Einfluß auf die pulsatorischen Vorgänge im zugehörigen Hauptstamm diskutiert worden. So liegen Untersuchungen darüber vor, welche Rückwirkung das Abklemmen von Seitenästen auf die Pulsformen im zugehörigen Hauptstamm bzw. ganz am Anfang des Seitenastes haben (BLEICHERT et al. (1952), ALEXANDER (1953), HARDUNG (1962), MEISNER und REMINGTON (1962), ATTINGER (1963), NEWMAN et al. (1973)); es liegen weiterhin Untersuchungen an Modellen vor, in denen Stromlinien, Geschwindigkeitsprofile oder Wandschubspannungen im Bereich von Aufzweigungen - zum Teil unter Berücksichtigung der Richtung des abgehenden Astes, der Strömungsform und den Radiusverhältnissen von Hauptstamm und Seitenast - bestimmt worden sind (STEBBENS (1959), KNOX (1962), ATTINGER (1964), KROVETZ und CROWE (1967), LING et al. (1969), ZELLER et al. (1970), BRECH und BELLHOUSE (1973), TALUKDER (1974)). Trotzdem sind noch immer Fragen im Zusammenhang mit Seitenästen offen, die zwar schon diskutiert, aber noch nicht oder nur teilweise beantwortet sind. So wurde schon vor längerer Zeit die Frage gestellt, ob und inwieweit Seitenäste im Arteriensystem "Wellenfallen" darstellen, d.h. ob und unter welchen Bedingungen die Rückwirkung eines Seitenastes auf die Pulse im Hauptstamm nicht mehr feststellbar ist (HARDUNG (1952) und (1964), WETTERER und KENNER (1968)).

Diese Frage ist wichtig im Zusammenhang mit der Klärung der Entstehung der normalen und der pathologischen Pulsformen. Es wurde weiterhin die Frage aufgeworfen, ob es erlaubt ist, an Aufzweigungen in hydrodynamischen Wellenleitungen die Reflexionsfaktoren entsprechend

denen an Verzweigungen in elektrischen Wellenleitungen allein aus den Wellenwiderständen zu berechnen, obwohl bei der Ableitung dieser Gleichungen die Wirbel und Ablösungszonen der Strömung, die durch die Krümmungen am Abgang eines Seitenastes von seinem Hauptstamm hervorgerufen werden, nicht berücksichtigt werden (HARDUNG (1962) und (1964)). Dieses Problem ist deswegen von Bedeutung, da für den Fall, daß Wirbel und Ablösungszonen an Seitenastabgängen eine wesentliche Rolle spielen, man dies in Kreislaufmodellen, mit deren Hilfe das Zustandekommen von Pulsformen untersucht und erklärt werden soll, berücksichtigen muß. Eng im Zusammenhang damit steht die Frage, wie groß der Einfluß des Winkels, unter dem der Seitenast abgeht, auf den Druckverlauf bzw. auf die Verteilung der Stromstärke auf Hauptstamm und Seitenast ist (MARTIN (1966), SARKYA (1967)). Diese Frage ist besonders für die Gefäßchirurgen bei der Rekonstruktion von Arterien sowie für die Herzchirurgen bei dem Anlegen von aorto-koronaren Bypässen von Wichtigkeit (KENNEDY et al. (1974), VOGEL et al. (1975)). Im Rahmen dieser Arbeit soll mit Hilfe eines theoretischen Modells sowie von physischen Schlauchmodellen versucht werden, eine Antwort auf einige dieser Fragen zu finden.

2. Theoretische Grundlagen und Methodik

Eine vollständige mathematische Beschreibung der örtlichen und zeitlichen Verteilung von Druck, Stromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in einem Schlauchsystem, in dem sich Pulswellen fortpflanzen, ist zwar prinzipiell möglich, jedoch wegen der Kompliziertheit der Gleichungen, die ein solches System beschreiben, außerordentlich aufwendig. Selbst unter so stark vereinfachenden Annahmen wie Reflexionsfreiheit oder Homogenität des Schlauches ist der Aufwand zur Berechnung der Änderungen von Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Querschnitt immer noch beträchtlich (WOMERSLEY (1955) und (1957), FRY und GREENFIELD (1964)). Will man Reflexionen oder allgemein Inhomogenitäten wie z.B. Abzweigungen von Seitenästen berücksichtigen, so führt praktisch nur die Betrachtungsweise weiter, daß man das Schlauchsystem als mechanische Wellenleitung beschreibt. Es lassen sich dann mit Hilfe der elektrischen Leitungstheorie (von LANDES (1942) in die Häemodynamik eingeführt; übersichtliche und didaktisch gut aufgebaute Darstellung von UNGER (1967)) örtliche und zeitliche Verteilung von Druck und Stromstärke in Schläuchen berechnen. Hierbei muß aber in Kauf genommen werden, daß man nur mit einer Ortskoordinate rechnen kann (in diesem Fall der Längskoordinate), sodaß die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über dem Querschnitt, also Geschwindigkeitsprofile, sowie Querschnittsänderungen selbst, also Querpulsationen, nicht erfaßt werden können. Zur Untersuchung von Pulsformen eignet sich dieser Ansatz jedoch recht gut.

Da auch mit Hilfe der Leitungstheorie die Verteilung von Druck und Stromstärke in inhomogenen Schlauchsystemen nicht ohne weiteres beschrieben werden kann, insbesondere wenn man nichtsinusförmige Vorgänge in Betracht ziehen will, ist es vorteilhaft, zur Untersuchung der Fragen nach Pulsformen und deren Abhängigkeit von Verzweigungen Modelle zu benutzen.

Die Begriffe aus der elektrischen Leitungstheorie wie Wellenwiderstand, Eingangswiderstand oder Reflexionsfaktor haben seit LANDES (1942) in die Häemodynamik Eingang gefunden. Deshalb soll hier eine kurze Einführung in die Leitungstheorie folgen, besonders deshalb, weil zur Untersuchung des Seitenastproblems die Reflexionsfaktoren an einem solchen Seitenastabgang eine wesentliche Rolle spielen, wie später noch gezeigt werden wird, zu deren Verständnis aber die Erläuterung der Grundlagen der Leitungstheorie unerlässlich ist. Im Anschluß daran sollen die für die Untersuchungen benutzten Modelle beschrieben werden.

2.1. Theorie der Wellenleitung

In der Leitungstheorie werden elektrische Ausbreitungsvorgänge beliebiger Art auf Leitungen behandelt.

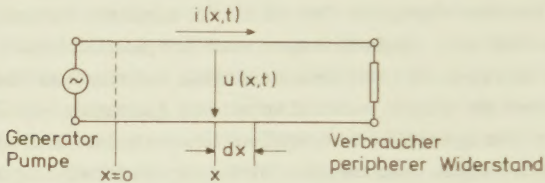


Abb.1 Allgemeine Darstellung einer Wellenleitung

Um die elektrische Spannung $u(x,t)$, die zwischen zwei parallelen Leitern entsprechend Abb.1 liegt, und dem Strom $i(x,t)$, der in den Leitern fließt, beschreiben zu können, greift man ein differentielles, homogenes Teilstück der Länge dx an der Stelle x heraus und stellt dies durch ein Ersatzschaltbild gemäß Abb.2 dar.

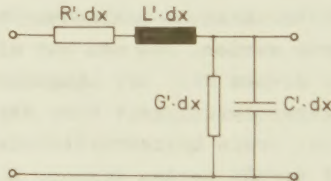


Abb.2 Ersatzschaltbild eines Elementes einer elektrischen Wellenleitung

Dabei sind als Kenngrößen solcher homogener elektrischer Leitungen definiert:

Ohmscher Widerstand pro Längeneinheit	$R'(\text{Ohm/cm})$
Selbstinduktivität pro Längeneinheit	$L'(\text{H/cm})$
Kapazität pro Längeneinheit	$C'(\text{F/cm})$
Leitwert pro Längeneinheit	$G'(\text{S/cm})$

Der Strich an den Größen bedeutet, daß diese jeweils auf die Längeneinheit bezogen sind. Dieses Ersatzschaltbild beschreibt vollständig die Eigenschaften einer homogenen elektrischen Leitung. Will man Leitungen ganz allgemeiner Art untersuchen, ist es zweckmäßig, die Längswiderstände zu einem komplexen Längswiderstand pro Längeneinheit z'_l und die Querkapazitäten zu einem komplexen Querkapazitätswert pro Längeneinheit z'_q zusammenzufassen, wie dies in Abb.3 geschehen ist.

2.1.1. Wellengleichung

Zum Aufstellen der Gleichungen für $u(x,t)$ und $i(x,t)$ werden für das differentielle Vierpolelement nach Abb.3 die Kirchhoffschen Gleichungen angesetzt.

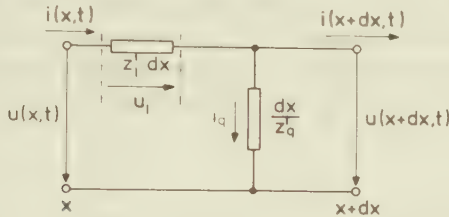


Abb.3 Allgemeines Ersatzschaltbild eines Elementes einer Wellenleitung

Die Knotengleichung lautet

$$i(x+dx,t) + i_q = i(x,t) \quad . \quad (1)$$

Mit

$$i(x+dx,t) = i(x,t) + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} \cdot dx \quad (2)$$

und

$$i_q = u(x+dx,t) \cdot \frac{dx}{z'_q} \approx u(x,t) \cdot \frac{dx}{z'_q} \quad (3)$$

$$\text{erh\u00e4lt man} \quad - \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = \frac{u(x,t)}{z'_q} \quad , \quad (4)$$

wobei in Gleichung (3) Glieder h\u00f6herer Ordnung vernachl\u00e4ssigt worden sind.

Die Maschengleichung liefert

$$u(x+dx,t) + u_1 = u(x,t) \quad . \quad (5)$$

Daraus ergibt sich wegen

$$u(x+dx,t) = u(x,t) + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \cdot dx \quad (6)$$

$$\text{und } u_1 = i(x,t) \cdot z'_1 \cdot dx \quad (7)$$

$$- \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = z'_1 \cdot i(x,t) \quad (8)$$

Dabei sind die Gleichungen (2) und (6) in Taylorsche Reihen entwickelt und die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt worden.

Aus den partiellen Differentialgleichungen (4) und (8) erhält man durch Elimination von $i(x,t)$ eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung für $u(x,t)$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{z'_1}{z'_q} \cdot u(x,t) \quad (9)$$

Man nennt diese Gleichung Wellengleichung. Ein entsprechender Zusammenhang läßt sich auch für $i(x,t)$ formulieren.

Um die Wellengleichung (9) auf hydrodynamische Wellenleitungen anwenden zu können, muß man berücksichtigen, daß die elektrischen Größen Spannung, Ladung und Stromstärke den hydrodynamischen Größen Druck, Volumen und Stromstärke formal analog sind (LANDES (1942), RONNIGER (1954), RÜDENBECK (1967), WETTERER und KENNER (1968, § 21)). Diese und weitere wichtige Analogien, die sich daraus ableiten lassen, sind in Tab. 1 zusammengestellt. Im folgenden sollen statt der elektrischen die hydrodynamischen Größen in den Gleichungen verwendet werden.

Zur Lösung der Gleichung (9) ist es von Vorteil, sich auf sinusförmige Zeitabhängigkeit zu beschränken, zumal ja beliebig ablaufende, sich wiederholende Vorgänge durch die Fourieranalyse bzw. einmalige Vorgänge durch das Fourierintegral auf eine solche Zeitabhängigkeit gebracht werden können. Man ersetzt dann $p(x,t)$ und $i(x,t)$ durch die komplexen Amplituden $P(x)$ und $I(x)$:

$$p(x,t) = P(x) \cdot \exp(j\omega t) \quad (10)$$

$$i(x,t) = I(x) \cdot \exp(j\omega t) \quad (11)$$

Tabelle 1. Analogiebeziehungen zwischen den wichtigsten Größen der elektrischen und der hydrodynamischen Wellenleitung, bezogen jeweils auf ein Element der Länge dx

Elektrische Größen	Bezeichnung	Dimension	Hydrodynamische Größen	Bezeichnung	Dimension
Spannung	u	Volt	Druck	p	dyn/cm^2
Ladung	q	Coulomb	Volumen	V	cm^3
Stromstärke	i	Ampere	Stromstärke	i	cm^3/sec
Induktivität	$L'dx$	Henry	Wirksame Masse	$M'dx$	g/cm^4
Kapazität	$C'dx$	Farad	Compliance (elastische Weirbarkeit)	$C'dx$	cm^5/dyn
Ohmscher Längswiderstand	$R'dx$	Ohm	Strömungswiderstand	$R'dx$	$\text{dyn}\cdot\text{sec}/\text{cm}^5$
Leitwert	$G'dx$	Siemens	Leitwert	$G'dx$	$\text{cm}^5/(\text{dyn}\cdot\text{sec})$
Widerstand (in Serie zur Kapazität)	R'_w/dx	Ohm	Innere Wandreibung	R'_w/dx	$\text{dyn}\cdot\text{sec}/\text{cm}^5$
Wellenwiderstand	Z	Ohm	Wellenwiderstand	Z	$\text{dyn}\cdot\text{sec}/\text{cm}^5$

Mit diesem Separationssatz läßt sich Gleichung (9) folgendermaßen schreiben

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} = \frac{z_1'}{z_q'} \cdot P(x) \quad (12)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung 2. Ordnung lautet

$$P(x) = P_1 \cdot \exp(-\gamma x) + P_2 \cdot \exp(+\gamma x) \quad , \quad (13)$$

wobei $\gamma^2 = \frac{z_1'}{z_q'}$ (14)

gilt, wie sich durch Einsetzen von (13) in (12) verifizieren läßt.

γ ist das von den Eigenschaften der Leitung abhängige, im allgemeinen ebenfalls komplexe Übertragungsmaß. Zerlegt man γ in Real- und Imaginärteil

$$\gamma = \beta + j\alpha \quad , \quad (15)$$

setzt dies in den ersten Term auf der rechten Seite der Gleichung (13) ein und berücksichtigt noch die Zeitabhängigkeit von $P(x)$ nach Gleichung (10), so ergibt sich

$$\vec{p}(x, t) = P_1 \cdot \exp(-\beta x) \cdot \exp(j(\omega t - \alpha x)) \quad . \quad (16)$$

Dabei bedeutet $\vec{p}(x, t)$ eine sich in peripherer Richtung fortpflanzende Druckwelle. Der Faktor $\exp(-\beta x)$ bewirkt ein exponentielles Absinken von P_1 , weshalb β auch als Dämpfungsmaß bezeichnet wird, während der Faktor $\exp(j(\omega t - \alpha x))$ den orts- und zeitabhängigen Phasenzustand der Druckwelle beschreibt. Die Geschwindigkeit eines bestimmten Zustandes, also einer Phase $\omega t - \alpha x = \text{const.}$, ergibt sich daraus zu

$$\frac{dx}{dt} = c = \frac{\omega}{\alpha} \quad . \quad (17)$$

c wird als Phasengeschwindigkeit und α als Phasenmaß bezeichnet. Die Phasengeschwindigkeit ist im allgemeinen frequenzabhängig.

Ein solches zeitproportionales Fortschreiten von Phasenzuständen längs einer Leitung wird als Welle bezeichnet. $P(x)$ setzt sich demnach aus zwei Wellen zusammen, einer rechtläufigen $P_1 \cdot \exp(-\gamma x)$ und einer rückläufigen $P_2 \cdot \exp(+\gamma x)$, die sich jeweils mit der Phasengeschwindigkeit c fortpflanzen und deren Amplituden mit $\exp(-\beta x)$ in Fortpflanzungsrichtung abnehmen.

Setzt man Gleichung (13) in Gleichung (8) ein, dann erhält man eine der Gleichung (13) entsprechende Gleichung für $I(x)$

$$I(x) = \frac{\gamma}{z_1} (P_1 \cdot \exp(-\gamma x) - P_2 \cdot \exp(+\gamma x)) . \quad (18)$$

Das Minuszeichen bei den rückläufigen Stromstärkewellen ist Ausdruck dafür, daß die Stromstärke im Gegensatz zum Druck richtungsabhängig ist, da die Strömung einer positiven Pulswelle in der jeweiligen Fortpflanzungsrichtung erfolgt. So besitzt eine peripherwärts laufende positive Pulswelle eine positive Wellenströmung, eine entgegengesetzt, also zentralwärts laufende positive Welle eine negative Strömung. Für negative Pulswellen gilt jeweils das umgekehrte.

Die Stromstärke setzt sich also ebenso wie der Druck aus recht- und rückläufigen Wellen zusammen. Da dies im Fall des Drucks die Summe, im Fall der Stromstärke aber die Differenz der recht- und rückläufigen Wellen darstellt, sind der Druck- und der Stromstärkeverlauf an einem bestimmten Ort der Wellenleitung im allgemeinen voneinander verschieden. Aber auch für den Fall, daß keine rückläufigen Wellen auftreten, also P_2 gleich Null ist, sind Druck- und Stromstärkeverlauf an derselben Stelle nicht gleich, solange der Faktor γ/z_1 komplex ist. Erst bei einer Wellenleitung, bei der dieser Faktor konstant ist (= verlustlose Wellenleitung, s.u.), ist nach Gleichung (18) $I(x)$ allein proportional zu P_1 , sodaß erst jetzt Druck und Stromstärke denselben Verlauf zeigen.

2.1.2 Wellenwiderstand, Eingangswiderstand

Die komplexe Größe $z_1'/\gamma = (z_1' \cdot z_q')^{1/2}$ hat die Dimension eines Widerstandes und wird als Wellenwiderstand Z der Wellenleitung bezeichnet

$$Z = (z_1' \cdot z_q')^{1/2} . \quad (19)$$

Der Wellenwiderstand ist eine charakteristische Größe der Wellenleitung. Er ist das Verhältnis nur der rechtläufigen bzw. nur der rückläufigen Druck- und Stromstärkewellen, er stellt also nicht das Verhältnis von Gesamtdruck und Gesamtstromstärke dar, wie man aus folgendem sieht.

Gesamtdruck und Gesamtstromstärke setzen sich jeweils aus den recht- und rückläufigen Wellen zusammen

$$P(x) = \vec{P}(x) + \bar{P}(x) \quad (20)$$

$$I(x) = \vec{I}(x) + \bar{I}(x) \quad (21)$$

Dabei sind die Abkürzungen eingeführt

$$\vec{P}(x) = P_1 \cdot \exp(-jx) = Z \cdot \vec{I}(x) \quad (22)$$

$$\bar{P}(x) = P_2 \cdot \exp(+jx) = -Z \cdot \bar{I}(x) \quad (23)$$

Daraus folgt

$$Z = \vec{P}(x)/\vec{I}(x) = \bar{P}(x)/(-\bar{I}(x)) \quad (24)$$

Der Wellenwiderstand einer Leitung läßt sich direkt aus den mechanischen Eigenschaften eines Schlauches und den Eigenschaften der im Schlauch strömenden Flüssigkeit errechnen. Betrachtet man im einfachsten Fall nur die wirksame Masse der Flüssigkeit pro Längeneinheit M' im Schlauch und die elastische Weirbarkeit der Wand pro Längeneinheit C' (Abb. 4a), so ist $z'_l = j\omega M'$ und $z'_q = 1/j\omega C'$; Z errechnet sich daraus zu

$$Z = (j\omega M' / j\omega C')^{1/2} = (M' / C')^{1/2} = (\rho \cdot \kappa / Q^2)^{1/2} = \rho \cdot c / Q \quad (25)$$

Hierbei sind die Zusammenhänge $M' = \rho / Q$, $C' = Q / \kappa$ und $\kappa = \rho \cdot c^2$ benutzt mit ρ = Dichte der Flüssigkeit und c = Pulswellengeschwindigkeit (Herleitung dieser Formeln siehe WETTERER und KENNER (1968)). Der Volumenelastizitätsmodul κ ist das auf die Volumeneinheit bezogene Druck-Volumen-Verhältnis $V \cdot dp/dV$; der Zusammenhang zwischen κ und C' ist dadurch gegeben, daß $C' \cdot l$ das Volumen-Druck-Verhältnis dV/dp einer Schlauchleitung der Länge l darstellt. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß die wirksame Masse einer Flüssigkeitssäule der Induktivität in einem elektrischen Vierpolelement entspricht. Dieser sehr nützliche Begriff wurde von FRANK (1903) bei der Umrechnung von Kraft, Länge und Zeit in die Einheiten Druck, Volumen

und Zeit eingeführt. Die wirksame Masse nimmt mit zunehmendem Querschnitt ab, im Gegensatz zur tatsächlichen Masse einer Flüssigkeitssäule, die mit zunehmendem Querschnitt zunimmt.

Die Gleichung $Z = \gamma \cdot c / \lambda$ wird in der englischsprachigen Literatur auch als waterhammer formula bezeichnet. In diesem einfachsten Fall ist der Wellenwiderstand reell und die Wellenleitung dämpfungsfrei, da γ rein imaginär wird und somit das Dämpfungsmaß $\beta = 0$ sein muß (vgl. Gleichung (15)). Eine solche Leitung wird auch als verlustlose Wellenleitung bezeichnet.

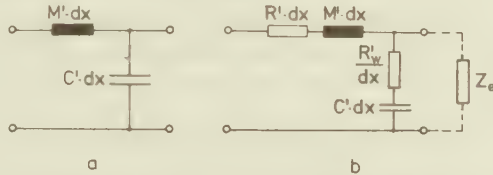


Abb.4 Vierpolelement einer hydrodynamischen Wellenleitung
a) ohne Verluste b) mit Verlusten

Betrachtet man neben der wirksamen Masse M' und der Compliance C' noch die Flüssigkeitsreibung pro Längeneinheit R' sowie die innere Wandreibung mal Längeneinheit R'_w (vgl. Abb.4b), so ergibt sich z'_l in Form von $z'_l = R' + j\omega M'$, ebenso z'_q in Form von $z'_q = R'_w + 1/j\omega C'$, sodaß sich der Wellenwiderstand Z ergibt zu

$$Z = (R'R'_w + M'/C' + j(\omega R'_w M' - R'/\omega C'))^{1/2}. \quad (26)$$

In diesem Fall ist der Wellenwiderstand komplex und die Wellenleitung mit Dämpfung behaftet.

Für die Behandlung vieler Probleme darf der Wellenwiderstand von weiten Schläuchen bzw. von großen und mittleren Arterien als reell und somit die Wellenleitung als dämpfungsfrei angenommen werden, da die Dämpfung in diesen Fällen sehr klein bzw. nicht von entscheidender Bedeutung ist. So zeigt ein Vergleich der am dämpfungsfreien, theoretischen Modell berechneten mit den am physischen Schlauchmodell registrierten Pulsen (s.unten), daß der Einfluß der Dämpfung keinen grundsätzlichen Unterschied zwischen diesen Pulsen hervorruft; man kann deshalb die Untersuchungen über den Einfluß eines

Seitenastes auf die Pulsform ist leichtern noch an einem einfachen Modell durchführen. Als weiteres Beispiel sei erwähnt, daß die natürlichen Pulsformen im menschlichen Arteriensystem entlang der Aorta und ihrer Fortsetzungen in den Beinarterien ebenfalls an einem dämpfungsfreien Modell auf befriedigende Art nachgeahmt werden können, wie BAUER et al. (1977) sowie BUSSE et al. (1977) gezeigt haben.

Abb.4a stellt in solchen Fällen ein recht gutes Ersatzschaltbild einer hydrodynamischen Wellenleitung dar.

Setzt man den Gesamtdruck und die Gesamtstromstärke an einer bestimmten Stelle der Leitung ins Verhältnis, dann erhält man den Eingangswiderstand der Wellenleitung an dieser Stelle. Sind an irgendeiner beliebigen Stelle der Leitung $P(x)$ und $I(x)$ bekannt, so ist auch der Quotient der beiden, nämlich $Z_i(x)$ bekannt (i ist die Abkürzung für input impedance, die englische Bezeichnung für Eingangswiderstand). Betrachtet man Z_i an der Stelle $x = 0$, so kann man schreiben

$$Z_{i0} = P_0/I_0 . \quad (27)$$

An der Stelle $x = 0$ erhält man andererseits aus den Gleichungen (13) und (18)

$$P_0 = P_1 + P_2 \quad (28)$$

$$Z \cdot I_0 = P_1 - P_2 . \quad (29)$$

Daraus ergibt sich

$$P_1 = (P_0 + Z \cdot I_0)/2 \quad (30)$$

$$P_2 = (P_0 - Z \cdot I_0)/2 . \quad (31)$$

Setzt man (30) und (31) in (13) und (18) ein, bildet das Verhältnis $I(x)/I(x)$ und berücksichtigt, daß $\cosh \gamma x = (\exp(+\gamma x) + \exp(-\gamma x))/2$ und $\sinh \gamma x = (\exp(+\gamma x) - \exp(-\gamma x))/2$, so ergibt sich der Eingangswiderstand an der Stelle x zu

$$Z_i(x) = Z \cdot (Z_{i0}/Z - \tanh \gamma x) / (1 - Z_{i0}/Z \cdot \tanh \gamma x) . \quad (32)$$

Dabei ist Z der Wellenwiderstand der Leitung an der Stelle x .

2.1.3. Reflexionsfaktor, reflektierte Wellen, peripherer Widerstand

Von besonderem Interesse ist für die folgenden Untersuchungen die Frage, wie sich Druck und Stromstärke beim Übergang von einem Schlauch mit dem Wellenwiderstand Z_1 in einen Schlauch mit dem Wellenwiderstand Z_2 verhalten (Abb.5). Eine solche Stelle wird als Stoßstelle oder Zwischenreflexionsstelle bezeichnet. Legt man die Stelle $x = 0$ an den Übergang zwischen den beiden Schläuchen, so erhält man entsprechend den Gleichungen (30) und (31)

$$P_1 = (P_0 + Z_1 \cdot I_0)/2 \quad (33)$$

$$P_2 = (P_0 - Z_1 \cdot I_0)/2 \quad (34)$$

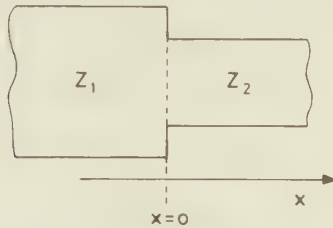


Abb.5 Übergang zwischen zwei Leitungen mit unterschiedlichen Wellenwiderständen

Das Verhältnis von P_0/I_0 stellt den Eingangswiderstand Z_{i0} des zweiten Schlauchs dar, da P_0 der Gesamtdruck und I_0 die Gesamtstromstärke sind.

Bildet man den Quotienten aus den Gleichungen (33) und (34) und setzt $P_0/I_0 = Z_{i0}$, so erhält man

$$P_2/P_1 = k = (Z_{i0} - Z_1)/(Z_{i0} + Z_1) \quad (35)$$

Die komplexe Größe k wird Reflexionsfaktor genannt. Dabei handelt es sich bei diesem k nach Gleichung (35) um einen globalen Reflexionsfaktor, da man auf Grund dieser Gleichung nicht trennen kann, wieviel von dem peripherwärts laufenden Druckpuls P_1 an dem Übergang zwischen den beiden Schläuchen und wieviel z.B. am Endwiderstand des zweiten Schlauchs reflektiert wird. Um den Reflexionsfaktor der Übergangsstelle allein zu erhalten, muß man sich den zweiten

Schlauch als homogen und unendlich lang vorstellen (vgl. NOORDERGRAAF (1969)). Dann wird der Eingangswiderstand Z_1 des zweiten Schlauches gleich seinem Wellenwiderstand Z_2 , was sich aus Gleichung (32) ergibt, wenn man x sehr groß werden läßt. Damit erhält man den - im allgemeinen ebenfalls komplexen - lokalen Reflexionsfaktor an den Übergang zwischen den beiden Schläuchen.

$$k_{1,2} = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) . \quad (36)$$

Im Falle der Abzweigung eines Seitenastes erhält man den lokalen Reflexionsfaktor dadurch, daß man Z_2 als den Gesamtwellenwiderstand der parallel geschalteten Schläuche des weiterführenden Hauptstammes und des Seitenastes betrachtet und beide Schläuche jeweils als homogen und unendlich lang annimmt.

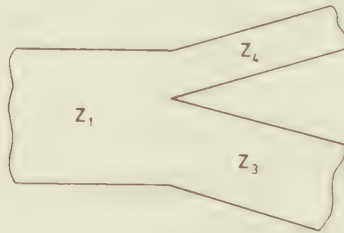


Abb.6 Aufzweigung einer Leitung in zwei Leitungen unterschiedlichen Wellenwiderstandes

Ist Z_4 der Wellenwiderstand des Seitenastes und Z_3 der des weiterführenden Hauptstammes (Abb.6), so ergibt sich als lokaler Reflexionsfaktor für peripherwärts laufende Wellen

$$k_{1,34} = \frac{1 - Z_1/Z_3 - Z_1/Z_4}{1 + Z_1/Z_3 + Z_1/Z_4} . \quad (37)$$

Der lokale Reflexionsfaktor für rückläufige Wellen, die im Hauptstamm zentralwärts auf die Abzweigung treffen, lautet

$$k_{3,14} = \frac{1 - Z_3/Z_1 - Z_3/Z_4}{1 + Z_3/Z_1 + Z_3/Z_4} . \quad (38)$$

Schließlich ist der lokale Reflexionsfaktor für Wellen, die aus dem Seitenast kommen,

$$k_{4,13} = \frac{1 - Z_4/Z_1 - Z_4/Z_3}{1 + Z_4/Z_1 + Z_4/Z_3} \quad . \quad (39)$$

Im Gegensatz zum Reflexionsfaktor beim Übergang zwischen zwei Schläuchen sind die Reflexionsfaktoren für aus verschiedenen Schlauchteilen kommende Wellen an einer Abzweigungsstelle nicht nur dem Vorzeichen, sondern auch dem Betrag nach im allgemeinen unterschiedlich. Es sei noch darauf hingewiesen, daß auch die Reflexionsfaktoren an der Abzweigung prinzipiell komplex sind, da alle Wellenwiderstände komplex sind.

Trifft ein Druckpuls P_1 auf eine Stoßstelle, so entsteht durch die Reflexion an dieser Stelle ein neuer Druckpuls. Die Amplitude P_2 dieses Pulses ist nach Gleichung (35)

$$P_2 = P_1 \cdot k \quad . \quad (40)$$

Am Reflexionsort selbst überlagern sich die beiden Pulse, sodaß sich hier die Druckamplitude P_3 ergibt zu

$$P_3 = P_1 + P_2 = P_1 \cdot (1 + k) \quad . \quad (41)$$

P_3 ist zugleich die Druckamplitude des weiterlaufenden Pulses. Der Druck wird also an einer Stoßstelle überhöht, wenn der Reflexionsfaktor positiv ist.

Die Amplitude des reflektierten Strompulses ist entsprechend Gleichung (35)

$$I_2 = I_1 \cdot k \quad , \quad (42)$$

da P_1 proportional zu I_1 und P_2 zu I_2 ist. Ist I_3 die peripherwärts nach der Stoßstelle weiterlaufende Stromstärkeamplitude, so muß nach dem Kontinuitätsprinzip gelten

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad . \quad (43)$$

Daraus erhält man

$$I_3 = I_1 - I_2 = I_1 \cdot (1 - k) \quad . \quad (44)$$

Der weiterlaufende Strompuls ist also im Vergleich zu dem der ankommenden Welle bei positivem Reflexionsfaktor vermindert. Der reflektierte Strompuls I_2 ist negativ, da als positive Stromstärke die Stromstärke in peripherer Richtung vereinbart ist.

Aus den Gleichungen (42) und (44) läßt sich das allgemeine Prinzip ableiten, daß Strompulse und Druckpulse immer mit entgegengesetzten Vorzeichen reflektiert werden. Dies läßt sich auch schon aus den Gleichungen (13) und (18) ablesen.

Schließlich soll noch die Frage des Endwiderstandes, des sog. peripheren Widerstandes, kurz diskutiert werden. Ist eine Wellenleitung mit dem Widerstand Z_e abgeschlossen, wie dies in Abb. 4b angedeutet ist, so erhält man für den Reflexionsfaktor an diesem Widerstand durch Einsetzen dieses Widerstandes in Gleichung (36)

$$k = (Z_e - Z)/(Z_e + Z) \quad . \quad (45)$$

Z sei dabei der Wellenwiderstand der unmittelbar vor dem Widerstand Z_e liegenden Leitung. Man kann nun folgende Fälle unterscheiden:

1. Z_e ist reell ($Z_e = R_e$) und die Leitung ist verlustlos, Z ist also ebenfalls reell.

Falls $R_e > Z$, ist die Reflexion positiv, und k kann nur Werte zwischen 0 und +1 annehmen. Am Ende der Leitung stellt sich ein Maximum der Druckamplituden und ein Minimum der Stromstärkeamplituden ein.

Falls $R_e < Z$, erhält man eine negative Reflexion, k kann dann nur Werte zwischen 0 und -1 annehmen. Am Ende der Leitung stellt sich ein Maximum der Stromstärke und ein Minimum der Druckamplituden ein.

Den Fall $R_e = Z$ bezeichnet man als Anpassung, da hier keine reflektierten Wellen auftreten; der Schlauch verhält sich dann wie ein unendlich langer Schlauch.

Im Falle eines reellen Abschlußwiderstandes und einer verlustlosen Wellenleitung tritt zwischen der ankommenden und der reflektierten Welle keine Phasenverschiebung auf.

2. Z_e ist unendlich groß. Diesen Fall bezeichnet man als Leerlauf. k wird hier gleich $+1$, es tritt also positive Totalreflexion auf. Am Ende der Leitung ist die Stromstärke Null und die Druckamplituden haben ein Maximum.

3. Z_e ist Null. Diesen Fall bezeichnet man als Kurzschluß. k wird hier gleich -1 , es tritt also negative Totalreflexion auf. Am Ende der Leitung ist jetzt der Druck Null und die Stromstärkeamplituden haben ein Maximum.

Die in den Fällen 1. bis 3. angegebenen Vorzeichen von k beziehen sich auf Druckpulse.

4. Z_4 ist imaginär. Dies ist der Fall bei einer sog. reinen Blindlast, d.h. bei rein kapazitivem bzw. rein induktivem Verhalten des Abschlußwiderstandes. Hier tritt Totalreflexion auf, der Betrag von k ist gleich $+1$, denn es wird wie bei 2. und 3. am Leitungsende keine Energie verbraucht. Es tritt aber eine Phasenverschiebung zwischen ankommender und reflektierter Welle auf, da k jetzt komplex ist, wobei der Phasenwinkel vom Verhältnis der Blindlast zum Wellenwiderstand des letzten Leitungsstückes bestimmt wird.

5. Z_4 und Z sind komplex (= verlustbehaftete Wellenleitung). Dies ist der allgemeinste Fall. Die Größe und das Vorzeichen von k hängen wieder vom Verhältnis von Z_e zu Z ab; da k hier komplex ist, tritt eine Phasenverschiebung zwischen der ankommenden und der reflektierten Welle auf.

2.2. Theoretisches Schlauchmodell

Zur Untersuchung des Einflusses eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm wurde ein digitales Computermodell benutzt, da nur so der Einfluß von verschiedenen Längen, Wellenwiderständen und Endreflexionsfaktoren eines Schlauchsystems in einem genügend weiten Bereich erfaßt werden konnte.

Bei diesem Modell handelt es sich um eine Weiterentwicklung eines früher beschriebenen 3-teiligen, unverzweigten Modells (BAUER et al. (1973)), mit dessen Hilfe die wichtigsten Merkmale der arteriellen Pulse entlang der Aorta und ihrer Fortsetzung in den Beinarterien befriedigend nachgeahmt werden konnten. Zur Beantwortung der hier vorliegenden Fragen wurde dieses Modell zu einem Modell mit Seitenast erweitert und außerdem berücksichtigt, daß die Pulse am Anfang

des Modells entsprechend den Verhältnissen in natürlichen Kreislauf rhythmisch eingegeben werden können.

Diesem Modell liegen folgende Vorstellungen zugrunde.

Zur Berechnung eines Pulses verfährt man den Weg des am Eingang in das Modell eingegebenen primären Pulses - des sog. Urpulses oder auch Primärpulses - solange, bis dieser Puls vernachlässigbar klein geworden ist. Der Primärpuls hat für Druck und Streckenwerte die gleiche Form, da diese Definitionsgewalt keine rückläufigen Pulse überlagert sind.

Wählt man anstelle eines Ort-Zeit-Diagramms ein Laufzeit-Zeit-Diagramm, wie dies zuerst REMINGTON (1951) für ein graphisch ausgewertetes Modell vorgeschlagen hat, so kann man linear rechnen und muß nicht die in den einzelnen Abschnitten des Modells vorgegebenen unterschiedlichen Pulswellengeschwindigkeiten berücksichtigen. In Abb.7 ist ein Laufzeit-Zeit-Diagramm für ein zweiteiliges Schlauchmodell, also ein Modell mit nur einer Zwischenreflexionsstelle (k_z), dargestellt.

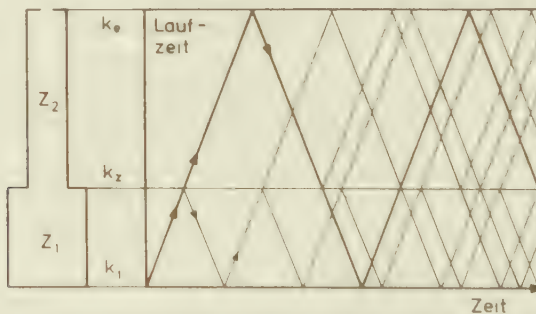


Abb.7 Zeit-Laufzeit-Schema eines zweiteiligen Schlauchmodells. Die Pfeile geben die Fortpflanzungsrichtung der Pulswellen an.

- k_1 = Reflexionsfaktor am Anfang
- k_z = Zwischenreflexionsfaktor
- k_e = Endreflexionsfaktor

Die Linien geben den Verlauf von u.B. den Pulsbeginn der einzelnen Pulse wieder, wobei der Beginn des Pulses, der nur am Ende (k_e) bzw. wieder am Anfang (k_1) des Modells reflektiert wird, besonders hervorgehoben ist. An der Zwischenreflexionsstelle entstehen bei jedem Durchgang eines Pulses neue Pulse, sodaß mit fortschreitender Zeit die Anzahl der im Modell hin- und herlaufenden Pulse zunimmt. Eine

Fortpflanzung z.B. der Pulswellenlänge ist bei diesem zweiteiligen Schlauchmodell und bei Eingabe der Pulse am Anfang des Modells nur längs der im Diagramm wiedergegebenen Linie möglich.

Betrachtet man das Verhalten von Pulsen an solchen Zwischenreflexionsstellen, so kann man drei Fälle unterscheiden (vgl. Abb.8):

1. Für rückläufige Pulse gilt: die an einer Stoßstelle peripherwärts weiterlaufenden Pulse (A) müssen mit dem Faktor $(1-k)$, die an der Stoßstelle reflektierten, also wieder zentralwärts laufenden Pulse (B), mit dem Faktor $+k$ multipliziert werden.

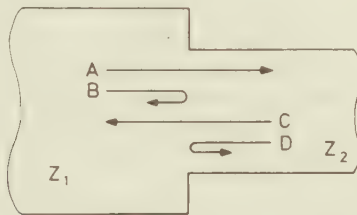


Abb. 8 Fortpflanzungsrichtungen für Pulse an einer Übergangsstelle zwischen zwei Leitungen (Stoßstelle)

A und B für von zentral ankommende Pulse,
C und D für aus der Peripherie kommende Pulse.

2. Für rückläufige Pulse gilt: die an einer Stoßstelle von peripher ankommenden und zentralwärts weiterlaufenden Pulse (C) müssen mit dem Faktor $(1-k)$, die an der Stoßstelle reflektierten, also wieder peripherwärts laufenden Pulse (D), mit dem Faktor $-k$ multipliziert werden.

3. Pulse, die am Anfang des Systems, also z.B. im Arteriensystem an der geschlossenen Aortenklappe, reflektiert werden, müssen wegen der hier stattfindenden positiven Reflexion mit einem Faktor $+k$, im Falle einer positiven Totalreflexion demnach mit $+1$, multipliziert werden.

Alle diese Rechenvorschriften gelten für Druckpulse. Für Strompulse muß $+k$ jeweils durch $-k$ ersetzt werden, da Strompulse immer mit dem entgegengesetzten Vorzeichen reflektiert werden wie Druckpulse (s.o.). Die Multiplikationsfaktoren ergeben sich aus den

Kontinuitätsbedingung an einer Reflexionsstelle; die sich beziehen auf die Faktoren in den Gleichungen (40), (41) und (44).

Zum besseren Verständnis wird bei der weiteren Beschreibung des Modells auf das FORTRAN-Programm in Anhang 3.1V hingewiesen. Mit diesem Programm, das praktisch das Modell beinhaltet, können an jedem Punkt im Modell Druck- und Strompulse berechnet werden.

Zur Berechnung eines Pulses teilt man das Laufzeit-Zeit-Schema des Modells in zwei Felder derart ein, daß die Punkte des einen Feldes (A) zwischen die des anderen Feldes (R) zu liegen kommen (Abb.9).

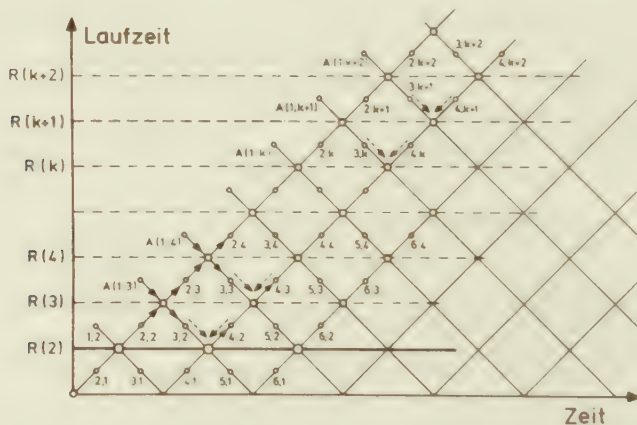


Abb. 9 Zeit-Laufzeit-Schema des unverzweigten Computermodells.
Erläuterung im Text.

Das Feld A ist ein zweidimensionales Feld; es stellt das Feld der Faktoren dar, mit denen der Primärpuls im Verlauf des Systems Punkt für Punkt vor bzw. nach jeder Stoßstelle entsprechend den oben aufgeführten Rechenvorschriften multipliziert werden muß; da es sich um ein digitales Modell handelt, können Beiträge zu den Pulsen nur an den diskreten Punkten des Feldes A geliefert werden. Der erste Faktor des Feldes A, nämlich $A(2,2)$, wird zweckmäßigerweise gleich 1 gesetzt (vgl. Anhang 3.1V, Seite 27). Man muß den Punkt $A(2,2)$ als Startpunkt bzw. die Zeile $A(2,2)$, $A(3,2)$, $A(4,2)$ usw. als die zentralen Multiplikationsfaktoren im Modell wählen, da es bei FORTRAN nicht möglich ist, in Feldern 0 als Index zu verwenden; wie weiter

unten noch beschrieben wird, ist es aber zweckmäßig, das Feld A in einer Laufreihenfolge zu berechnen, wobei man beispielsweise auch z.B. die Feldelemente $A(1,2)$, $A(1,3)$ oder auch $A(3,1)$ und $A(4,1)$ auftreten, die bei der Wahl von $A(1,1)$ als erstem Faktor des Feldes A mit 0 indiziert werden müßten. Die Indizes der Feldelemente der im weiteren als Reihen bezeichneten Diagonalen $A(2,2)$, $A(2,3)$, $A(2,4)$ bzw. $A(3,2)$, $A(3,3)$, $A(3,4)$ usw. sowie der als Zeilen bezeichneten Elemente $A(2,2)$, $A(3,2)$, $A(4,2)$ bzw. $A(1,3)$, $A(3,3)$ usw. sind in der beschriebenen Weise gewählt, damit Speicherplatz im Rechner gespart werden kann.

Das Feld R beinhaltet die Reflexionsfaktoren; für diese ist nur ein eindimensionales Feld nötig, da die Reflexionsfaktoren in diesem Modell als unabhängig von der Zeit angenommen sind, sich innerhalb einer Zeile also nicht ändern sollen. Das Feldelement von R für den zentralen Reflexionsfaktor kann prinzipiell beliebig gewählt werden, da es hier nur auf die richtige Zuordnung zwischen dem Feld A und dem Feld R ankommt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auch hier das Element $R(2)$ als zentraler Reflexionsfaktor gewählt.

Das Feld A ist so angelegt, daß die Punktreihen abwechselnd nur rechtläufige Pulse ($A(2,2)$, $A(2,3)$, $A(4,2)$, $A(4,3)$ usw.) oder nur rückläufige Pulse ($A(1,3)$, $A(1,4)$, $A(3,2)$, $A(3,3)$ usw.) enthalten können; dies ist durch entsprechende Pfeile in Abb.9 angedeutet. Z.B. kann sich ein Puls vom Punkt $A(2,3)$ aus nur zu den Punkten $A(2,4)$ und $A(3,3)$ fortpflanzen, wobei dieser Puls im Punkt $A(2,4)$ weiterhin rechtläufig, im Punkt $A(3,3)$ dagegen rückläufig ist. Zum Punkt $A(2,4)$ gelangen Pulse außer von Punkt $A(2,3)$ nur vom Punkt $A(1,4)$, wobei dieser Puls von $A(1,4)$ wieder rechtläufig ist, zum Punkt $A(3,3)$ gelangen Pulse außer vom Punkt $A(1,4)$ nur von $A(2,3)$ aus, wobei dieser Puls von $A(2,3)$ dann in $A(3,3)$ rückläufig ist. Es können also in den Punkten $A(2,2)$, $A(2,4)$ usw. nur rechtläufige, in den Punkten $A(3,2)$, $A(3,3)$, $A(3,4)$ usw. nur rückläufige Pulse enthalten sein. Jeder Punkt des Feldes A läßt sich aus zwei vorher berechneten Punkten und den dazwischen liegenden Reflexionsfaktoren gemäß den oben angeführten Vorschriften berechnen. Hierbei besteht ein Vorteil der gegenseitigen Anordnung der Felder A und R darin, daß auf diese Weise völlig sichergestellt ist, um welchen der vier Fälle aus Abb.8 es sich jeweils handelt. Zur Berechnung des Feldes A geht man so vor, daß man zuerst die Reihe $A(2,2)$, $A(2,3)$, $A(2,4)$

usw. bis zum Ende des Systems. Der periphere Urpuls wird, berechnet. Diese erste Reihe ist jeweils zu einem zu berechnen, bis zu diesem ersten peripherwärts laufenden Urpuls noch kein reflektierter, wieder zentralwärts laufender Puls einen Beitrag liefert kann. Anschließend berechnet man die nächsten Reihen des Feldes A in der Weise, daß nacheinander $A(3,2)$, $A(4,2)$, dann $A(3,3)$, $A(4,3)$ usw. ermittelt werden. Diese Reihenfolge muß eingehalten werden, so z.B. zu $A(4,2)$ nicht nur von $A(4,1)$, sondern auch von $A(3,2)$ ein Beitrag geliefert werden kann; d.h. es können jetzt auch reflektierte Pulse auftreten. Da bei der Berechnung der Multiplikatoren immer wieder die gleichen Rechenschritte vorgenommen werden müssen, ist es möglich, das Feld A in einer Laufschleife zu berechnen (vgl. Anhang S.V, ab Seite 64).

Hat man das Feld A bis zum Systemende berechnet, dann werden die jeweils benachbarten Multiplikatoren für die rechtläufigen und die rückläufigen Pulse, also z.B. $A(3,2)$ und $A(4,2)$, $A(3,3)$ und $A(4,3)$ usw., addiert, wie dies in Abb. 9 durch die gestrichelten Pfeile neben den Punkten $A(3,2)$ und $A(4,2)$, $A(3,3)$ und $A(4,3)$ usw. angedeutet ist. Bei dieser Punkt-für-Punkt-Berechnung im digitalen Modell können sich die Multiplikationsfaktoren für den Primärpuls zwischen zwei Reflexionsstellen nicht. Deshalb ist es möglich, z.B. den Punkt $A(3,3)$ zwischen $R(3)$ und $R(4)$ zu verschieben, wenn man die richtige Zuordnung zur Zeitachse berücksichtigt. Addiert man also den Faktor im Punkt $A(3,3)$ zu dem im Punkt $A(4,3)$, dann bedeutet das, daß man beide Faktoren soweit zu kürzeren Laufzeiten hin verschiebt, bis sie beide in $R(3)$ zusammenfallen. Zugleich müssen sie natürlich auch zeitlich zusammenfallen, da, wie schon bei Abb. 7 erwähnt, eine Fortpflanzung von Pulsen im Laufzeit-Zeit-Schema nur auf den Verbindungslinien zwischen den Punkten des Feldes A möglich ist. Daher teilen dann das Feld A und das Feld A mit den Laufzeit-Zeit-Schema, sodaß auf diese Weise auch Pulse an den Reflexionsstellen selbst sowie unmittelbar am Anfang und unmittelbar am Ende des Systems berechnet werden können.

Zur Berechnung eines Pulses multipliziert man den Urpuls nacheinander mit den Multiplikatoren der Zeile des Feldes A, die der gewünschten Laufzeit entspricht, und bildet die Summe der so entstehenden Einzelpulse unter Berücksichtigung des jeweiligen zeitlichen Abstandes der Multiplikatoren.

Hat man die Punkte $A(3,2)$ und $A(4,2)$, $A(3,3)$ und $A(4,3)$ usw. addiert, dann ist in einer Zeile dieses neuen Feldes A (größere

Kreise in Abb.9) die Punktdichte genau halb so groß wie in einer Reihe (bezogen auf den gleichen Zeitabschnitt), da ein Puls, um zum nächsten Punkt in einer Zeile zu gelangen, zum nächsten Punkt in einer Reihe hin- und wieder zurücklaufen muß. Diesen Umstand muß man bei der Wahl der Punktabstände für die Multiplikatoren und für den zu berechnenden Puls bzw. Urpuls berücksichtigen.

Die Berechnung ist am einfachsten, wenn man den Laufzeitabstand der Multiplikatoren halb so groß wählt wie den Punktabstand im Primärpuls, also z.B. für die Multiplikatoren 5 msec und für den Primärpuls 10 msec als Abstände annimmt. In diesem Fall multipliziert man den Primärpuls nacheinander mit den Faktoren einer Zeile. Wählt man für beide den gleichen Punktabstand, dann muß der Primärpuls zweimal unmittelbar hintereinander mit demselben Faktor einer Zeile multipliziert werden. Nur diese beiden Fälle sind im Programm berücksichtigt (vgl. Anhang S.V. Zeilen 80 und 82 sowie 104 und 106).

Wählt man für den Puls einen Punktabstand von 10 msec, so muß man bei einer Länge des Urpulses von z.B. 300 msec die Pulse im Dämpfungsfreien System über ca. 6 sec verfolgen, bis die Multiplikatoren vernachlässigbar klein geworden sind; beim Modell ohne Seitenast ist der einzige Abfluß und somit auch die einzige Stelle, an der ein Energieverlust der Pulse eintritt, der Endwiderstand mit einem Endreflexionsfaktor kleiner als 1. Zur Berechnung des Pulses über eine so lange Zeit benötigt man ein sehr großes Feld A, sodaß der Speicherplatzbedarf für das Programm sehr groß wird. Man kann nun Speicherplatz einsparen, indem man nicht erst das ganze Feld A der Primärpuls-multiplikatoren und anschließend die Pulse berechnet, sondern jeweils sofort den Urpuls mit dem in der gewünschten Zeile gerade berechneten Multiplikator multipliziert und diesen Einzelpuls laufzeitgerecht zum Gesamtpuls addiert. Man benötigt zur Berechnung der Reihen $A(3,k)$ und $A(4,k)$ neben den Reflexionsfaktoren nur die Punkte der Reihen $A(1,k)$ und $A(2,k)$. Hat man also die Reihen $A(3,k)$ und $A(4,k)$ berechnet, dann benötigt man die Reihen $A(1,k)$ und $A(2,k)$ nicht mehr, da die Beiträge von $A(1,k)$ und $A(2,k)$ ihrerseits zum Gesamtpuls schon direkt nach deren Berechnung berücksichtigt wurden. Man kann also die Reihen $A(1,k)$ und $A(2,k)$ mit den Reihen $A(3,k)$ und $A(4,k)$ überschreiben (vgl. Anhang z.B. S.V. Zeilen 69 und 70); diese benötigt man ihrerseits wieder zur Berechnung der beiden nächsten Reihen. Somit kommt man unabhängig von der Zeit, über die

man den Puls im System verfolgt, mit einem Feld A aus, das aus nur vier Reihen besteht.

Für den Seitenast muß das Diagramm durch ein Feld B und ein Feld für die Reflexion (steigend im Seitenast fallend) erweitert werden. Das Feld B ist ebenso eingelegt wie das Feld A für den Hauptstamm. In Abb. 10 ist das Laufzeit-Zeit-Schema für die Abzweigungsstelle wiedergegeben.

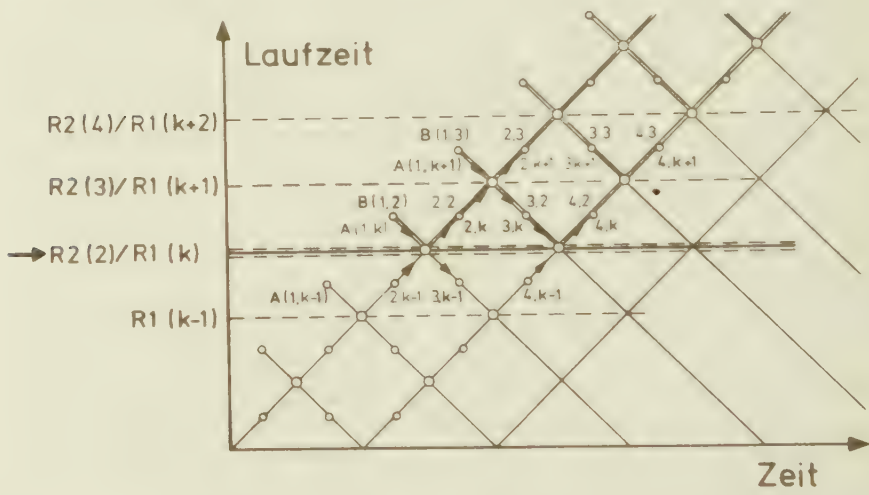


Abb. 10 Zeit-Laufzeit-Schema des Hauptstammteils mit Seitenast. Der Pfeil markiert die Stelle, an der der Seitenast abgeht. Weitere Erklärungen im Text.

Hier am Verzweigungspunkt werden, falls ein Puls, der im Hauptstamm peripherwärts auf die Abzweigung trifft, sowohl im Hauptstamm als auch im Seitenast fortfließen; das gleiche gilt natürlich für Pulse, die aus der Peripherie kommend, zentralwärts auf die Abzweigung treffen. Pulse, die nur im Seitenast in den Hauptstamm einmünden, pflanzen sich hier sowohl peripher- als auch zentralwärts fort.

So tragen zur Berechnung des Punktes B(4,2) im Laufzeit-Zeit-Schema nicht nur der Multiplikationsfaktor von B(3,2), sondern auch die Faktoren von A(3,k) und A(4,k-1) bei; zum Punkt A(4,k) trägt neben den Punkten A(4,k-1) und A(3,k) noch der Faktor von B(3,2) bei und zum Punkt A(3,k-1) tragen die Faktoren der Punkte A(2,k-1), A(1,k) und zusätzlich noch B(1,2) bei. Man benötigt zur Berechnung dieser drei Multiplikationsfaktoren am Übergang zwischen Hauptstamm und Seitenast jeweils drei und nicht nur zwei der vorher ermittelten Faktoren. Daher muß die Berechnung der Abzweigungsstelle im Programm gesondert vorgenommen werden und kann nicht in denselben Laufscheifen erfolgen wie die Berechnung der übrigen Punkte der Felder A bzw. B (vgl. Anhang S.VI, ab Zeile 119).

Bei der Konstruktion von Strompulsen muß man im Modell mit Seitenast eine Besonderheit beachten. Strompulse, die zentralwärts laufen, ändern, wenn sie an der Abzweigungsstelle in den Seitenast hineinfließen, ihr Vorzeichen, da sie im Seitenast nicht mehr zentralwärts, sondern wieder peripherwärts laufen. Ebenso muß für Strompulse, die aus dem Seitenast heraus peripherwärts in den weiterführenden Hauptstamm hinein laufen, das Vorzeichen umgekehrt werden (vgl. Anhang S. VI, Zeilen 132 und 133 bzw. 139 und 140).

Eine weitere Besonderheit bei der Berechnung von Strompulsen im Modell mit Seitenast gegenüber den Druckpulsen besteht darin, daß sich neben der Überhöhung bzw. Verminderung durch die Reflexionsfaktoren die Amplituden der Strompulse entsprechend den Wellenwiderständen des weiterführenden Hauptstammes und des Seitenastes aufteilen. Bezeichnet man mit Z_1 den Wellenwiderstand des zur Abzweigung führenden Hauptstammes, mit Z_3 den des weiterführenden Hauptstammes und mit Z_4 den Wellenwiderstand des Seitenastes entsprechend Abb.6, so teilt sich der in peripherer Richtung auf die Aufzweigung treffende Strompuls i folgendermaßen auf:

$$\text{in den Seitenast fließt} \quad i_{1,4} = iZ_3 / (Z_4 + Z_3), \quad (46)$$

$$\text{in den weiterführenden Hauptstamm} \quad i_{1,3} = iZ_4 / (Z_4 + Z_3). \quad (47)$$

Für Strompulse i , die in zentraler Richtung auf die Aufzweigung treffen gilt:

in den Seitenast fließt $i_{3,4} = iZ_1 / (Z_1 + Z_4)$, (48)

in den weiterführenden Hauptstamm fließt $i_{3,1} = iZ_4 / (Z_1 + Z_4)$. (49)

Schließlich gilt für Strompulse i , die aus dem Seitenast in den Hauptstamm zurücklaufen:

in den zentralen Hauptstamm fließt $i_{4,1} = iZ_3 / (Z_1 + Z_3)$, (50)

in den peripheren Hauptstamm fließt $i_{4,3} = iZ_1 / (Z_1 + Z_3)$. (51)

Dabei muß natürlich in jedem der drei Fälle die Summe der beiden Faktoren 1 ergeben.

Um den im Arteriensystem gegebenen periodischen Druck- und Stromstärkeverlauf nachzuahmen, addiert man den berechneten Druck- bzw. Strompuls nach der gewünschten Pulslänge im stationären Zustand jeweils wieder beginnend mit dem Pulsanfang zu sich selbst, wie dies in Abb.11 gezeigt ist, und wiederholt diesen Vorgang so oft, bis der Pulsbeginn und das Pulsende der so entstehenden periodischen Pulse auf dem gleichen Niveau liegen, bis also ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Dieser Gleichgewichtszustand wird hierbei umso später erreicht werden, je größer die Reflexionsfaktoren im Modell angenommen werden.



Abb.11 Zur Berechnung eines Pulses bei wiederholter Eingabe eines Primärpulses in eine Wellenleitung. Unten: Puls bei einmaliger Eingabe des Primärpulses. Oben: Pulse im stationären Zustand bei rhythmischer Eingabe des Primärpulses.

Diese Art der Berechnung eines Pulses im stationären Zustand ist wesentlich einfacher als etwa eine Berechnung bei rhythmischer Eingabe des Urpulses in das Modell, da sie mit einem sehr geringen Rechenaufwand zu bewerkstelligen ist.

Das hier beschriebene Modell stellt das Grundmodell für die Berechnung von Druck- und Strompulsen in einer verlustlosen Wellenleitung dar; sowohl die Wellenwiderstände und Pulswellengeschwindigkeiten als auch alle Reflexionsfaktoren sind als reell und somit zeitunabhängig angenommen. Das Modell läßt sich durch einige Erweiterungen dahingehend abändern, daß z.B. frequenzunabhängige oder auch, mit entsprechend größerem Aufwand, frequenzabhängige Dämpfung der Pulse berücksichtigt werden kann. Da aber alle derartigen komplizierten Modelle von diesem Grundmodell hergeleitet sind und in dieser Untersuchung von Pulsen in einem Schlauchmodell mit Seitenast nur mit dem einfachen, verlustfreien Modell gearbeitet werden soll, wird hier auf eine weitere Ausführung des Modells verzichtet.

2.3. Physisches Schlauchmodell mit Seitenast, Meßmethoden

Zur Untersuchung der Fragen, inwieweit es möglich ist, den Reflexionsfaktor an Abzweigungen in hydrodynamischen Wellenleitungen aus den Wellenwiderständen von Hauptstamm und Seitenast zu berechnen, und zum anderen, wie groß der Einfluß des Winkels, unter dem ein Seitenast abzweigt, auf den Reflexionsfaktor an der Abzweigungsstelle ist, wurde eine Versuchsanordnung aufgebaut, die auf das von KENNER und WETTERER (1962) und von WETTERER und KENNER (1968) beschriebene Verfahren zurückgeht.

Um allein die Wirkungen des Seitenastes zu untersuchen, wurde das einfachste Seitenastmodell gewählt, d.h. ein homogener Schlauch mit einem ebenfalls homogenen, engeren Schlauch als Seitenast. In Abb.12 ist der Versuchsaufbau wiedergegeben. Das ganze System ist mit Leitungswasser gefüllt, dem 4-Hydroxybenzoesäuremethylester zur Verhinderung der Bildung von Algen zugesetzt wurde. Dies erwies sich als notwendig, da durch die Ablagerung von Algen an den Schlauchwänden die Wandeigenschaften derart verändert werden können, daß reproduzierbare Messungen nicht möglich sind, wie sich schon bei den ersten Versuchen zeigte.

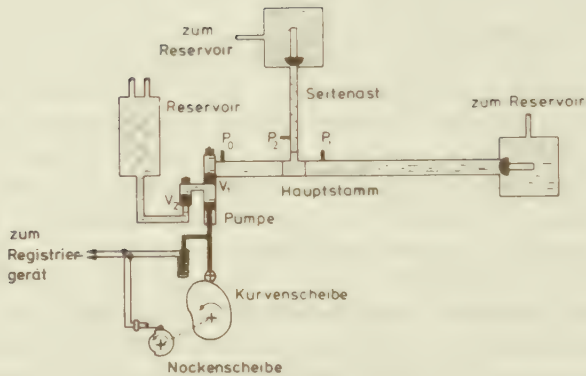


Abb.12 Schema der Versuchsanordnung mit Pumpe, Schläuchen von Hauptstamm und Seitenast, Endwiderständen und Reservoir. Erklärung im Text.

Die Pumpe besteht aus einem Zylinder mit Kolben; die in Längsrichtung geführte Kolbenstange wird von einer Kurvenscheibe angetrieben, wobei Zugfedern eine ständige Berührung zwischen dem am Ende der Stange befindlichen Kugellager und der Kurvenscheibe gewährleisten. Die Kurvenscheibe ist so geformt, daß die Stromstärke am Schlauchanfang den in Abb.13 wiedergegebenen dreieckförmigen Verlauf hat, also etwa dem Stromstärkeverlauf in der Aorta ascendens unmittelbar hinter der Aortenklappe entspricht.

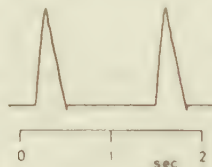


Abb.13 Stromstärke am Anfang des Schlauchmodells

An den Zylinder schließt sich ein System mit zwei Kugelventilen (Hartgummi-Kugeln) an. Durch das Kugelventil V_1 strömt während der Vorwärtsbewegung des Kolbens Wasser in den Anfang des Hauptstammes. Am Ende des Hauptstammes und des Nebenastes befinden sich Standgefäße, wie sie schon von BADER und WETTERER (1958) und WETTERER und BADER (1959) für Schlauchversuche verwendet wurden. Diese Standgefäße sind mit Wasser bis zur Höhe von 35 cm über den Schlauchachsen gefüllt. Als periphere Widerstände werden verschiebbare Konen verwendet, die an der Einmündung der beiden Schläuche in die Standgefäße angebracht sind, wie dies in Abb.12 angedeutet ist.

An den beiden Standgefäßen sind Überläufe angebracht, von denen das Wasser in ein Reservoir fließt. Dieses ist über einen Schlauch mit dem zweiten Ventil V_2 vor der Pumpe verbunden. Beim Zurückbewegen des Kolbens schließt sich das Ventil V_1 , und der Zylinder füllt sich über das Ventil V_2 mit dem Wasser aus dem Reservoir. Damit ist der Kreislauf geschlossen.

In dem System fanden verschiedene Schläuche Verwendung. Die Daten der Schläuche, an denen die wesentlichen Ergebnisse gewonnen wurden, sind in Tab.2 zusammengestellt.

Tabelle 2. Daten der in den Schlauchmodellen verwendeten Versuchsschläuche bei einem transmuralen Grundniveau des Druckes von 35 cm Wasser

	Dimension	Hauptstamm		Seitenäste	
		1.Teil	2.Teil	I	II
Wandstärke	cm	0,1		0,05	0,05
Innenquerschnitt	cm ²	12,4 $\pm$ 2%		6,6 $\pm$ 2%	2,4 $\pm$ 4%
Länge	cm	70,5 210		70	70
Pulswellengeschwindigkeit (Frontgeschwindigkeit)	cm/sec	740 $\pm$ 10%		635 $\pm$ 10%	635 $\pm$ 10%
Laufzeit	msec	95 285		110	110
Wellenwiderstand	dyn.sec/cm ⁵	60 $\pm$ 10%		96 $\pm$ 10%	265 $\pm$ 10%

Der Gummischlauch des Hauptstammes wurde von der Fa. Metzeler, die langen Gummistücke für die beiden Seitenäste von der Fa. Continental hergestellt. Die Schläuche für die Seitenäste wurden aus diesen langen Gummistücken zusammengeklebt, wobei als Kleber Silikon-Kautschuk verwendet wurde.

Die Abzweigungsstelle selbst besteht aus einem Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser von 40 mm, einer Wandstärke von 2 mm und Längen von 55 bzw. 80 mm, in das seitlich Rohre mit den zu den Seitenästen I bzw. II passenden Innendurchmessern von 16 bzw. 26 mm und Wandstärken von 0,5 bzw. 1 mm eingesetzt waren. Die Länge der Ansatzstücke war so gewählt, daß das in ihnen befindliche Wasservolumen bei allen Abzweigungswinkeln etwa gleich groß war. Obwohl es sich bei diesen Plexiglasröhren um starre Rohre handelt, haben sie keinen merklichen Einfluß auf die pulsatorischen Vorgänge im Schlauchmodell, da ihre Längen sehr klein sind im Verhältnis zu den Wellenlängen der in den Schläuchen sich fortpflanzenden Pulswellen. Es standen für die beiden Seitenäste je drei Abzweigungsstücke mit Abgangswinkeln von 30° , 60° und 90° zur Verfügung, sodaß bei jedem Modell jeweils folgende Abgangswinkel untersucht werden konnten: 30° , 60° , 90° , 120° und 150° , also auch schräg nach rückwärts führende Seitenäste. Die drei Abzweigungen für den Seitenast II sind in Abb. 14 wiedergegeben.

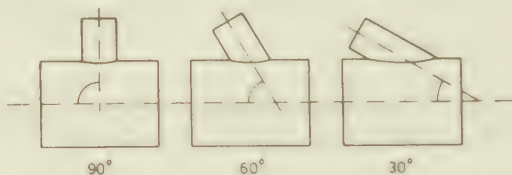


Abb. 14 Abzweigungsstücke für das Schlauchmodell mit dem Seitenast II. Die Winkel sind gerechnet als Winkel zwischen den peripherwärts gerichteten Schlauchachsen.

Über die beiden Enden des weiteren Rohres wurde der Schlauch des Hauptstammes, über das engere Rohr der des Nebenastes II gezogen und wasserdicht festgebunden.

Zur Registrierung der Geschwindigkeit des Kolbens und damit der Stromstärke der Pumpe dient ein stabförmiger Permanentmagnet, der parallel zur Kolbenstange angebracht ist, sich mit dieser auf- und abbewegt und in eine lange feststehende Spule eintaucht. Die Länge der Spule und des Magneten ist etwa dreimal so groß wie der Kolbenhub; bei Mittelstellung des Kolbens taucht der Magnet bis zur Mitte der Spule ein. Die in der Spule induzierte Spannung ist der Geschwindigkeit des Kolbens und damit der Stromstärke proportional. Da nur in

der Zeit, in der das Ventil V_1 offen ist, am Schlauchanfang Wasser in das System fließen kann, wurde durch einen von einer Nockenscheibe gesteuerten Kontakt dafür gesorgt, daß nur während dieser Zeit die Spannung an der Spule registriert wurde; während der restlichen Zeit war die Spule kurzgeschlossen.

Die Druckmessung im Schlauchmodell erfolgte an drei Stellen, unmittelbar am Anfang des Systems (p_0), 10 cm hinter dem Abgang des Seitenastes im Hauptstamm (p_1) und 10 cm nach der Aufzweigung im Seitenast (p_2); diese Meßstellen sind ebenfalls in Abb.12 eingezeichnet. Zur Druckmessung wurden Katheterspitzenmanometer (Millar PC-350 A) verwendet. Die Umsetzung des Drucks in das elektrische Signal erfolgt bei diesen Manometern durch eine Vollbrücken-Anordnung von Miniatur-Halbleiter-Elementen, deren elektrischer Widerstand dehnungsabhängig ist. Der Außendurchmesser des Manometers einschließlich Katheter beträgt nur 1,8 mm. Die Konstanz des Nullpunkts und der Empfindlichkeit ist hervorragend. Die obere Grenzfrequenz der Manometer beträgt etwa 30 kHz; die Manometerspitzen lagen seiteständig in Metallhülsen, die mittels einer äußeren kleinen Platte und einer entsprechenden inneren Gegenplatte wasserdicht in die Gummiwände der Schläuche eingefügt waren. Alle Signale wurden zunächst auf Magnetband gespeichert (Bell & Howell VR 3200) und dann mit Hilfe eines Computers (Hewlett-Packard 2100 A) ausgewertet.

3. Berechnungen am theoretischen Modell

3.1. Reflexionsfaktoren an der Abzweigung

Betrachtet man die Übergangsstelle (Stoßstelle) zwischen zwei aneinandergefügten Schläuchen mit unterschiedlichen Wellenwiderstand, so gilt, daß bei Abwesenheit von Seitenästen der Betrag des Reflexionsfaktors an der Stoßstelle unabhängig ist von der Laufrichtung der Wellen; die Vorzeichen der Reflexionsfaktoren für hin- und rückläufige Wellen sind jedoch immer einander entgegengesetzt, d.h. der Reflexionsfaktor ist für zentralwärts laufende Wellen negativ, wenn er für peripherwärts laufende positiv ist. Dies läßt sich aus der Gleichung (35) unmittelbar ersehen, wenn man beachtet, daß für zentralwärts laufende Wellen 2 und 1 vertauscht werden müssen.

Für die Reflexionsfaktoren an der Abzweigungsstelle in einem Modell mit Seitenast sind die Beziehungen nicht so einfach, da hier im allgemeinen nicht nur die Beträge der Stoßfaktoren für recht- und rückläufige Wellen unterschiedlich sind, sondern auch die Vorzeichen sich nur unter bestimmten Wellenwiderstandsverhältnissen umkehren.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den Reflexionsfaktoren $k_{1,34}$, $k_{3,14}$ und $k_{4,13}$, die hier allgemein als $k_{a,bc}$ bezeichnet werden sollen, und den Wellenwiderständen des Hauptstammes Z_1 und Z_3 und des Seitenastes Z_4 (vgl. Abb.6) ist es zweckmäßig, den Wellenwiderstand des 1. Hauptstammes Z_1 gleich 1 zu setzen. Entsprechend den Voraussetzungen des Modells werden alle Wellenwiderstände und damit auch die Reflexionsfaktoren als reell angenommen. Aus den Gleichungen (37), (38) und (39) kann man durch einfache Umformung Gleichungen der Art

$$Z_3 = f(Z_4, k_{a,bc}) \quad (52)$$

finden. So erhält man aus der Gleichung (37)

$$Z_3 = \frac{Z_4(1 + k_{1,34})}{Z_4 - 1 - k_{1,34}(1 + Z_4)} \quad (53)$$

aus Gleichung (38) folgt

$$Z_3 = \frac{Z_4(1 + k_{3,14})}{1 - Z_4 - k_{3,14}(1 + Z_4)} \quad , \quad (54)$$

und aus Gleichung (39) ergibt sich

$$Z_3 = \frac{Z_4(1 + k_{4,13})}{(Z_4 + 1)(1 + k_{4,13})} \quad . \quad (55)$$

Trägt man für jede dieser drei Gleichungen Z_3 in Abhängigkeit von Z_4 auf, wobei man jeweils $k_{a,bc}$ für eine bestimmte Kurve konstant hält, dann gewinnt man die in den Abb. 15, 16 und 17 wiedergegebenen Kurvenscharen für die drei möglichen Laufrichtungen von Wellen an der Abzweigungsstelle. In allen Fällen sind die Berechnungen der $k_{a,bc}$ nur bis zu den Punkten sinnvoll, in denen Z_4 gleich Z_3 ist, da darüberhinaus der weiterführende Hauptstamm und der Seitenast ihre Rolle vertauschen, der Hauptstamm also zum Seitenast wird und umgekehrt.

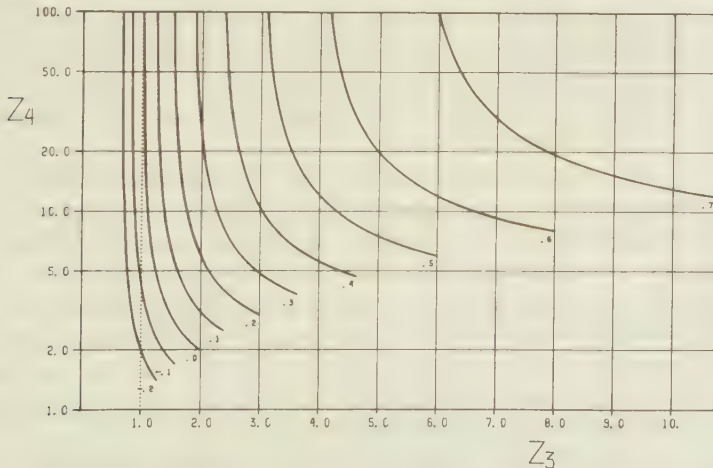


Abb. 15 Reflexionsfaktoren $k_{1,34}$ für im Hauptstamm peripherwärts auf eine Abzweigung treffende Pulswellen in Abhängigkeit von den Wellenwiderständen des weiterführenden Hauptstammes Z_3 und des Seitenastes Z_4 . Der Wellenwiderstand des zuführenden Hauptstammes Z_1 ist 1 gesetzt. Die Größe von $k_{1,34}$ ist an den Kurven jeweils links unten angeschrieben.

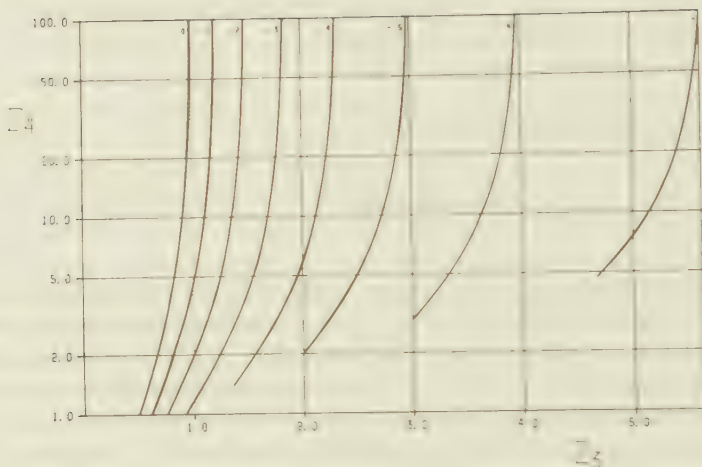


Abb. 16 Reflexionsfaktor $k_{3,14}$ für im weiterführenden Hauptstamm zentralwärts auf eine Abzweigung treffende Pulswellen in Abhängigkeit von den Wellenwiderständen des weiterführenden Hauptstammes Z_3 und des Seitenastes Z_4 . Der Wellenwiderstand des zentralen Hauptstammes Z_1 ist 1 gesetzt. Die Größe von $k_{3,14}$ ist an den Kurven jeweils links oben angegeben.

Aus den Abb. 15 und 16 sieht man, daß nur für den Fall, daß $Z_1 = Z_3 = 1$ (dieser Fall ist als gepunktete Linie eingezeichnet), der Wellenwiderstand des Hauptstammes eben nach der Abzweigung also nicht ändert, $k_{3,14}$ und $k_{4,13}$ dem Betrag nach gleich sind. Im Gegensatz zum unverzweigten Fall ist aber auch das Vorzeichen der Reflexionsfaktoren für beide Laufrichtungen gleich, und zwar jeweils negativ. Bei einer Abzweigungsstelle sind somit die Reflexionsfaktoren für hin- und rückläufige Wellen nur dann verschieden, wenn sich der Wellenwiderstand des weiterführenden Hauptstammes ändert.

Während der Reflexionsfaktor in einem unverzweigten Schlauchsystem nur dann Null ist, wenn sich der Wellenwiderstand nicht ändert, also Z_2 gleich Z_1 in Gleichung (36) ist, können reflexionsfreie Fälle an einer Abzweigung für Wellen im Hauptstamm bei ganz bestimmten Verhältnissen von Z_3 zu Z_4 auftreten, wobei diese Verhältnisse für

recht- und rückläufige Wellen unterschiedlich sind. Für rechtläufige Wellen ist $k_{1,34}$ dann gleich Null, wenn gilt

$$Z_3 = \frac{Z_4}{Z_4 - 1} \quad , \quad (56)$$

für rückläufige Wellen ist $k_{3,14}$ gleich Null, wenn erfüllt ist

$$Z_3 = \frac{Z_4}{Z_4 + 1} \quad . \quad (57)$$

Aus den Kurven $k_{a,bc} = 0$ sieht man, daß nur für sehr große Werte von Z_4 und bei einem homogenen Hauptstamm sowohl $k_{1,34}$ als auch $k_{3,14}$ zugleich Null oder zumindest fast Null sein können.

Der reflexionslose Zustand kann dagegen für Wellen, die aus dem Seitenast auf die Abzweigungsstelle treffen, in keinem Fall erreicht werden, wie man der Abb.17 entnehmen kann.

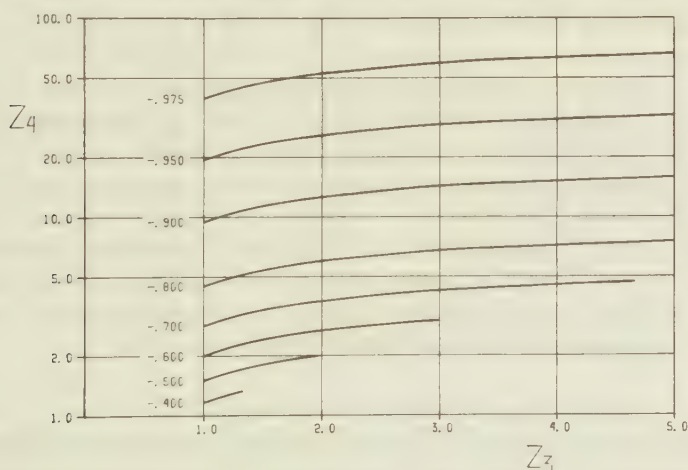


Abb.17 Reflexionsfaktor $k_{4,13}$ für aus dem Seitenast auf die Abzweigung treffende Pulswellen in Abhängigkeit von den Wellenwiderständen des weiterführenden Hauptstammes Z_3 und des Seitenastes Z_4 . Der Wellenwiderstand des zentralen Hauptstammes Z_1 ist 1 gesetzt. Die Größe von $k_{4,13}$ ist jeweils vor den Kurven angeschrieben.

Bezüglich der Vorzeichen der verschiedenen Reflexionsfaktoren zeigt sich, daß sowohl die im Seitenast als auch die im Hauptstamm zentralwärts auf die Abzweigung hinlaufenden Wellen immer negativ reflektiert werden, da letztere nur in extremen, im natürlichen Arteriensystem nicht vorkommenden Fällen, wie einem wesentlich niedrigeren Wellenwiderstand des weiterführenden als des zuführenden Hauptstammes positiv sein können. Begegnen Wellen aus dem Seitenast (Abb.17) schon bei relativ kleinem Wellenwiderstand des Seitenastes stark negativ an der Abzweigung reflektiert, da der zentralwärts und der peripherwärts gerichtete Teil des Hauptstammes, vom Seitenast aus betrachtet, als parallel geschaltet wirken. Dieses Verhalten verursacht die Besonderheiten der Pulse am Anfang eines Seitenastes, auf die weiter unten noch eingegangen wird.

Auch $k_{1,34}$ ist negativ, falls bei niedrigem Wellenwiderstand des Seitenastes der Wellenwiderstand des weiterführenden Hauptstammes nicht zu groß ist. Positive Reflexion tritt hier also entsprechend Gleichung (56) nur dann auf, wenn die Zunahme von Z_1 auf Z_3 umso größer gewählt wird, je kleiner Z_4 ist. Allerdings kann für solche Wellen der negative Reflexionsfaktor - wieder gemessen an den natürlichen Verhältnissen im Arteriensystem - niemals besonders groß werden, da selbst bei einer Aufzweigung eines Hauptstammes in zwei Äste mit je dem Wellenwiderstand des Hauptstammes $k_{1,34}$ nur -0.33 ist.

Allen diesen Überlegungen liegen, wie schon erwähnt, reelle Wellenwiderstände und somit auch reelle Reflexionsfaktoren zugrunde. Ob und inwieweit der Einfluß der Dämpfung prinzipielle Änderungen dieser Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Wellenwiderständen und Reflexionsfaktoren erfordert, soll im Zusammenhang mit den Messungen am Schlauchmodell diskutiert werden.

3.2 Rückwirkungen des Seitenastes auf die Pulse im Hauptstamm

Zur Beantwortung der Frage nach dem Einfluß eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm wurden Druckpulse in dem theoretischen Modell, das in Abb.18 wiedergegeben ist, im Hauptstamm einmal am Anfang (p_0) und zum anderen 15 msec nach der Abzweigung (p_1) berechnet, wobei neben dem Wellenwiderstand des Seitenastes Z_4 dessen Laufzeit bis zum Endwiderstand l_3 und dessen peripherer Reflexionsfaktor k_6 in einem weiten Bereich systematisch variiert

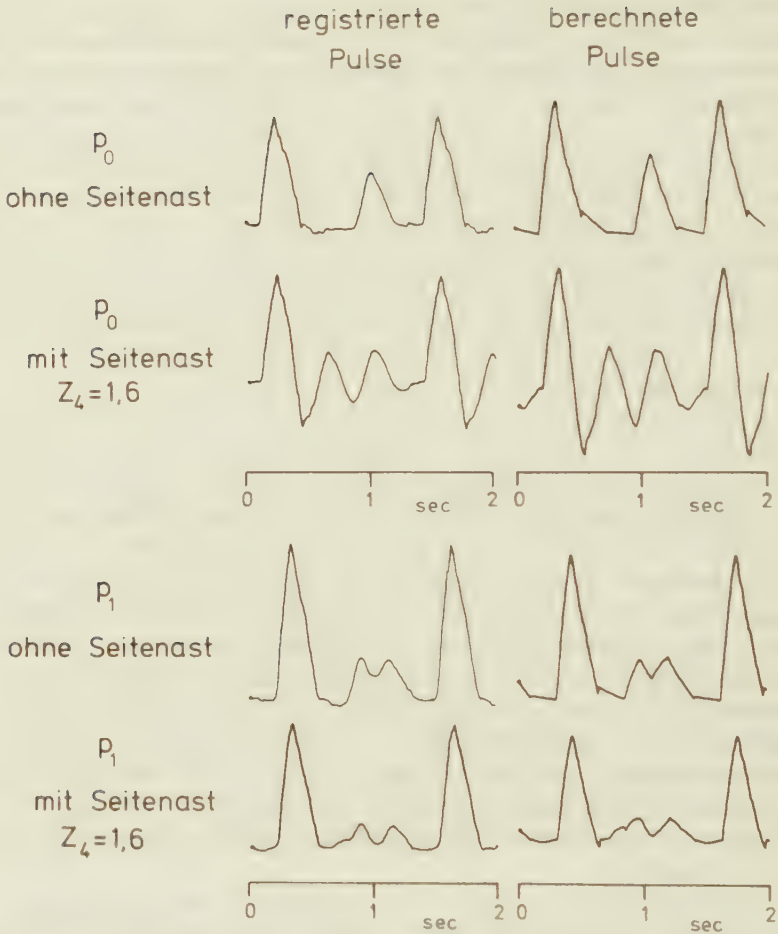


Abb.19 Vergleich der am Schlauchmodell registrierten mit den am theoretischen Modell mit den Daten des Schlauchmodells berechneten Druckpulse. Die Stellen p_0 und p_1 , an denen die Pulse registriert bzw. berechnet wurden, sind in den Abb.12 und 18 angegeben. Der Wellenwiderstand des Hauptstammes ist 1 gesetzt.

sichtigsten Dämpfung zeigen die Pulse sowohl für den Anfang des Hauptstammes (p_0) als auch für die distal der Abzweigung gelegenen Registrierstelle (p_1) mit und ohne Seitenast prinzipiell den gleichen Verlauf. Der periphere Widerstand des Schlauchmodells kann außer dem Reibungswiderstand eine geringe Trägheitskomponente enthalten, wie SIPKEMA (1973) gezeigt hat; der Abschlußwiderstand ist also komplex, was, wie oben ausgeführt, eine Phasenverschiebung zwischen den am Endwiderstand ankommenden und den dort reflektierten Pulswellen zur Folge hat. Im Gegensatz dazu ist der periphere Widerstand des theoretischen Modells ein reiner Reibungswiderstand, da er als reell angenommen ist, d.h. es wird hier keine Phasenverschiebung zwischen den ankommenden und den reflektierten Pulswellen berücksichtigt. Die gute Übereinstimmung der registrierten mit den berechneten Pulsen zeigt aber, daß die Wirkung der Massenbelastung im Endwiderstand auf die Pulsformen zu gering ist, als daß sie im theoretischen Modell berücksichtigt werden müßte. Es ist somit möglich, anhand der am theoretischen Modell berechneten Pulse Aussagen über die Pulsformen bzw. deren Änderungen in hydrodynamischen Wellenleitungen zu machen.

In Abb.20 sind Beispiele für Pulse aufgezeichnet, die am theoretischen Modell am Anfang des Hauptstammes (p_0) und kurz nach dem Abgang des Seitenastes (p_1) berechnet wurden. Unter den Druckpulsen des Modells ohne Seitenast sind die Druckpulse bei zunehmendem Wellenwiderstand Z_4 des Seitenastes abgebildet. Dabei wurden hier die Laufzeiten und der Endreflexionsfaktor des Seitenastes konstant gehalten. Vergleicht man die Pulsformen im Modell ohne Seitenast mit denen bei verschiedenen Z_4 , so zeigt sich, daß mit zunehmendem Z_4 der Einfluß des Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm immer kleiner wird und daß ab einem Wellenwiderstandsverhältnis von 1 : 20 zwischen den Wellenwiderständen von Hauptstamm und Seitenast sowohl bei den zentralen als auch bei den unmittelbar distal der Abzweigung registrierten Pulsen praktisch keine Rückwirkung mehr zu sehen ist.

Es soll hier auch auf einen wesentlichen Unterschied im Einfluß des Seitenastes auf die Pulse an den beiden Registrierstellen hingewiesen werden. Während im zentralen Puls bei niedrigen Z_4 die pulsatorischen Schwankungen zunehmen, wirkt der Seitenast auf die Pulse in der unmittelbaren Umgebung der Abzweigung "dämpfend", d.h. hier werden die Schwankungen in den Pulsen kleiner. Besonders deutlich

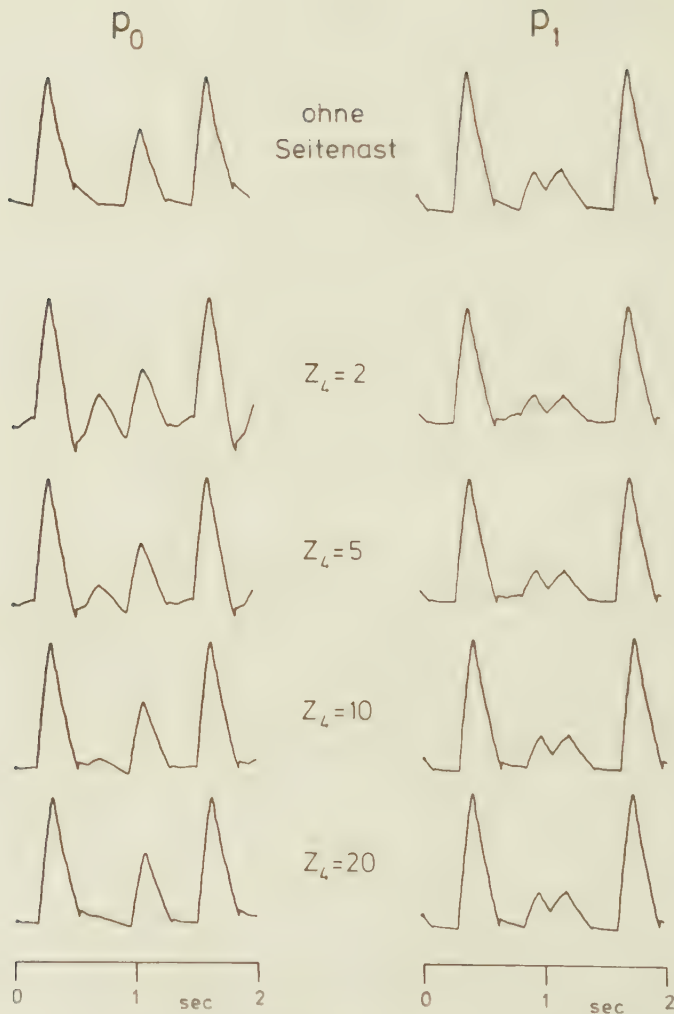


Abb.20 Am theoretischen Modell an den in Abb.18 angegebenen Stellen p_0 und p_1 berechnete Druckpulse.

Z_L = Wellenwiderstand des Seitenastes. Der Wellenwiderstand des Hauptstammes ist 1 gesetzt. Weitere Erklärung im Text.

ist diese Wirkung bei den Pulsen in Abb.19 zu sehen, da hier Z_4 noch kleiner als bei den Pulsen in Abb.20 ist. Dieser Unterschied erklärt sich daraus, daß die nach der Abzweigung peripherwärts weiterlaufenden Pulse wegen des negativen Reflexionsfaktors an der Abzweigung an dieser Reflexionsstelle nicht überhört, sondern abgeschwächt werden, während die an der Abzweigung auf Grund der Reflexion entstehenden, wieder zentralwärts laufenden Pulse an der zentralen Meßstelle verspätet eintreffen und als eigene negative Wellen in Erscheinung treten, die pulsatorischen Schwankungen somit dort zunehmen. Der erste Fall, nämlich die "Dämpfung" der pulsatorischen Schwankungen durch Seitenäste, spielt sicherlich auch im Arteriensystem eine Rolle.

Die im Modell berechneten Strompulse zeigen gegenüber den Druckpulsen den entsprechend der Gleichung (18) zu erwartenden Verlauf. Solange keine reflektierten, wieder rückläufigen Wellen auftreten, sind die Form des Druck- und des Strompulses einander gleich. Unmittelbar am Anfang des Systems entspricht der Strompuls, unabhängig von allen Veränderungen im Modell, im gesamten Verlauf dem Primärpuls (Abb.13), da alle rückläufigen Stromstärkewellen auf Grund der negativen Totalreflexion am Systemanfang sich hier genau auslöschen. Im Modell mit Seitenast ist der Strompuls im Hauptstamm distal vom Abgang des Seitenastes bei offenem Seitenast kleiner als der Strompuls im Modell ohne Seitenast; zwar ist der Reflexionsfaktor $k_{1,34}$ am Abgang des Seitenastes für Strompulse positiv, es kommt aber zu keiner Überhöhung der Stromstärkeamplituden, da durch die Aufteilung der Stromstärke in den weiterführenden Hauptstamm und in den Seitenast die Amplituden im Hauptstamm hinter der Abzweigung entsprechend abnehmen. Des weiteren zeigt sich, daß die erste vom Endwiderstand zurückkommende Welle, die im Druckpuls als positive Welle erscheint, im Strompuls wegen der negativen Reflexion der Strompulswellen am Endwiderstand als negative Welle auftritt. Auf eine ausführliche Diskussion und eine Darstellung der Strompulse wurde verzichtet, da die hier vorliegenden Fragen des Einflusses des Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm sowie die Abhängigkeit des Reflexionsfaktors vom Winkel der Abzweigung allein mit Hilfe der Druckpulse untersucht werden können und entsprechende Berechnungen an den Strompulsen zu den gleichen Ergebnissen führen.

Will man den Aussagen über den Einfluß eines Seitenastes auf den Hauptstamm, die man an theoretischen Modell gewinnen kann, auf das Arteriensystem übertragen, dann ist letztes Endes nur die Rückwirkung auf die Pulse in der Nähe der Abzweigung sowie geringer davon von Bedeutung. Nur hier lassen sich Analogien zwischen dem einfachen Modell nach Abb. 18 und Abzweigungen im Arteriensystem herstellen, da beim Arterienast als sehr langer guter Wellenleitung die Rückwirkung selbst großer, geringer gelegener Seitenäste auf zentrale Pulse durch die "Abschirmung" der dazwischen liegenden Reflexionsstellen unmerklich klein werden kann. Die Amplituden der Druckpulse werden vermindert, wenn sie aus einem Gebiet höheren Wellenwiderstandes in ein Gebiet mit niedrigerem Wellenwiderstand hineinlaufen (vgl. die Rechenvorschrift für die Wellen C in Abb. 8). Liegen also zwischen einem Seitenastabgang und einer zentralen Druckregistrierestelle mehrere, für zentralwärts laufende Pulse negative Reflexionsstellen, so kann der durch den Seitenast hervorgerufene Einfluß so sehr abgeschwächt werden, daß er nicht mehr feststellbar ist.

So würde sich sicherlich bei Pulsregistrierungen im Arteriensystem kein Einfluß der Mesenterialarterien oder der Nierenarterien, also der großen Seitenäste in der Bauchaorta, auf die zentralen Pulsformen zeigen, da selbst so massive Veränderungen wie die völlige Absperrung der beiden Oberschenkelarterien mittels aufblasbarer Manschetten, also eine Verkürzung des arteriellen Hauptstammes und eine Erhöhung des Endreflexionsfaktors auf nahezu +1, keinen wesentlichen Einfluß auf den zentralen Puls besitzen. Dies ist z.B. sehr gut einer Arbeit von WETTERER (1969) zu entnehmen (siehe dort Abb. 6). Im zentralen Puls können allenfalls die großen Äste am Aortenbogen eine Rückwirkung zeigen. Dagegen beeinflussen die großen Seitenäste der Bauchaorta die peripheren Druck- und Stimpulsformen recht deutlich; BUSSE et al. (1975) führen sogar die Entstehung der wesentlichen Formmerkmale der peripheren Pulse auf die großen Seitenäste in der Bauchaorta zurück.

Um ein objektives Maß für die Änderungen der Pulsform im Hauptstamm bei einer Änderung von Z_4 , l_e oder k_e zu erhalten, wurde folgendermaßen vorgegangen. Der Druckpuls wurde kurz hinter dem Abgang des Seitenastes im Hauptstamm (p_1) einmal ohne und einmal mit Seitenast berechnet, wobei jeweils nur die Eigenschaften des Seitenastes verändert wurden. Dabei wurde der Endreflexionsfaktor k_e

zwischen 0,1 und 0,7, die Laufzeit l_s zwischen 30 und 90 msec und der Wellenwiderstand zwischen $1 \cdot Z_0$ und $100 \cdot Z_0$ variiert. Die Pulse liegen aufgrund der digitalen Berechnung als Punktfolgen vor, wobei der Punktabstand 1 msec beträgt. Diese Pulse wurden nun so miteinander verglichen, daß Punkt für Punkt die Differenz zwischen beiden Pulsen gebildet und anschließend die Summe aus den Absolutwerten dieser Differenz berechnet wurde. Diese Summe (S) stellt dann ein Maß für die Rückwirkung eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm dar. Durch die Rechnung mit den Absolutwerten wird ein Unterschied in den Pulsformen besonders betont, da sich hierbei gegenläufige Schwankungen in den beiden Pulsen nicht aufheben können.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Abb. 21, 22 und 23 wiedergegeben.

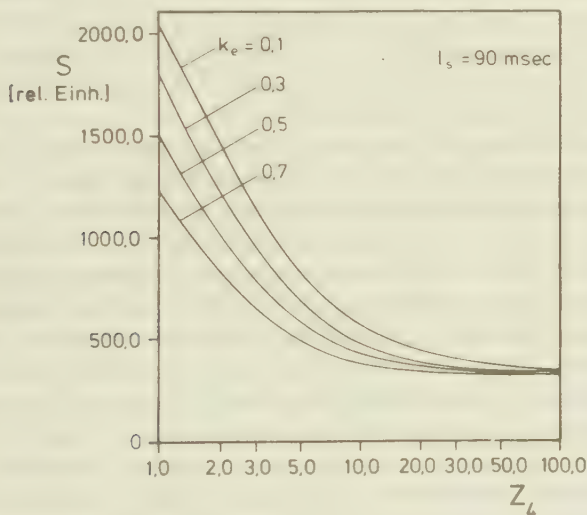


Abb. 21 Rückwirkung eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm (S) in Abhängigkeit vom Wellenwiderstand des Seitenastes (Z_4). l_s = Laufzeit im Seitenast, k_e = Endreflexionsfaktor im Seitenast. Der Wellenwiderstand des Hauptstammes ist 1 gesetzt. Erklärung von S im Text.

In Abb.21 sind bei konstanter Laufzeit im Seitenast die Pulsformänderungen in Abhängigkeit vom Wellenwiderstand des Seitenastes bei verschiedenen Endreflexionsfaktoren aufgetragen. Aus den Kurven sieht man, daß bei konstantem l_2 und bei konstantem k_2 der Einfluß auf den Druckpuls im Hauptstamm umso kleiner ist, je größer Z_4 ist; nach einem steilen Abfall bei niedrigen Z_4 werden selbst die Pulsformänderungen oberhalb etwa $Z_4 = 10 \cdot Z_1$ immer kleiner. Je größer Z_4/Z_1 ist, desto kleiner wird der Reflexionsfaktor $k_{1,34}$ entsprechend Gleichung (37), desto weniger wird der Druckpuls im Hauptstamm durch die Stoßstelle an der Abzweigung verändert. Wie aus dem Vergleich der Pulse in Abb.20 zu sehen war, ist bei $k_2 = +0,04$ ab einem Verhältnis Z_4/Z_1 von $1/20$ praktisch kein Einfluß des Seitenastes mehr zu erkennen. Wählt man die zu diesen Werten gehörige Summe der Absolutwerte der Differenzen ΔS der beiden Puls-kurven als Grenze, dann kann man sagen, daß, je nach peripherem Reflexionsfaktor, ab einem Wellenwiderstandsverhältnis von 15 bis 30 kein Einfluß eines einzelnen Seitenastes mehr zu erkennen ist. Ab einem solchen Verhältnis kann man also einen Seitenast als eine Wellenfalle im Sinne von HARDUNG (1952) bezeichnen, d.h. Wellen, die einmal in einen Seitenast hineingelaufen sind, laufen nur noch in diesem hin und her, da kein merklicher Anteil der Wellen wieder aus dem Seitenast in den Hauptstamm zurück gelangen kann. Im Gegensatz zu den am theoretischen Modell berechneten Pulsen treten im Arteriensystem natürlicherweise starke Schwankungen von Puls zu Puls auf. Diese Schwankungen sind zum Teil weit größer als die Unterschiede, die in Abb.20 z.B. am Anfang des Hauptstammes (p_0) zwischen den Druckpulsen im Modell mit $Z_4 = 10 \cdot Z_1$ und im Modell mit $Z_4 = 20 \cdot Z_1$ vorhanden sind. Man hat deshalb im Arterien-system bei Wellenwiderstandsverhältnissen von Hauptstamm zu Seiten-ast unterhalb $1/15$ sicherlich keinen Einfluß eines einzelnen Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm mehr zu erwarten. Diese Aussage soll weiter unten noch anhand von Pulsregistrierungen im Arteriensystem überprüft werden.

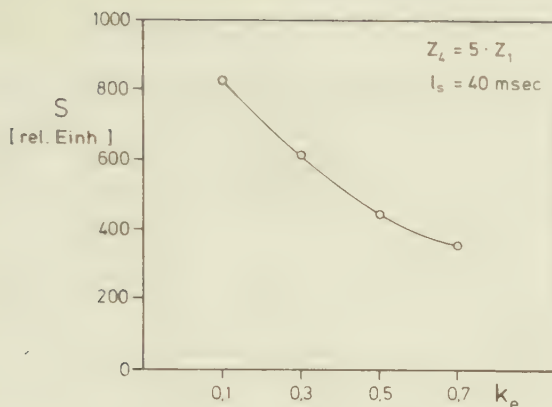


Abb. 22 Rückwirkung eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm (S) in Abhängigkeit vom Endreflexionsfaktor im Seitenast (k_e). l_s = Laufzeit im Seitenast, Z_4 = Wellenwiderstand des Seitenastes. Erklärung von S im Text.

Betrachtet man den Einfluß von k_e auf die Pulsformen im Hauptstamm, so zeigt sich folgendes. Variiert man nur k_e und hält die Laufzeiten im Hauptstamm sowie im Seitenast und das Verhältnis von Z_4/Z_1 konstant, so wird der Einfluß des Seitenastes (S) mit zunehmendem k_e kleiner. Diese Abhängigkeit gilt für alle Z_4 , wie man der Abb. 22 entnehmen kann, da sich die Kurven für die konstanten k_e nicht überschneiden. S wird deshalb mit wachsendem k_e kleiner, da bei einem größeren k_e die Amplituden der am Ende des Seitenastes reflektierten, wieder zentralwärts laufenden Pulse größer werden; damit gelangt aber auch - bei konstantem Z_4/Z_1 - ein größerer Prozentsatz der Druckamplituden um die doppelte Laufzeit im Seitenast verschoben aus dem Seitenast in den Hauptstamm zurück, was einen kleineren Einfluß des Seitenastes bedeutet.

Schließlich nimmt die Rückwirkung des Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm (S) ab mit abnehmender Laufzeit im Seitenast l_s . Dieser Zusammenhang ist in Abb. 23 für einen konstanten Endreflexionsfaktor k_e und ein konstantes Z_4 dargestellt. Der Einfluß der Länge des Seitenastes (hier als Laufzeit aufgetragen) ist allerdings kleiner als der des Endreflexionsfaktors, wie ein Vergleich der Maßstäbe für S in Abb. 22 und 23 zeigt. Dieser Vergleich ist

möglich, da S in den Abb. 21, 22 und 23 in jeweils den gleichen relativen Einheiten aufgetragen ist. Diese Abhängigkeit erklärt

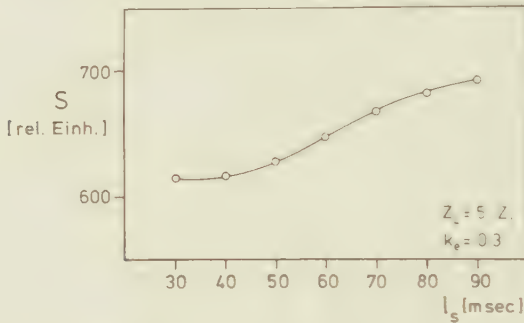


Abb. 23 Rückwirkung eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm (S) in Abhängigkeit von der Länge (Laufzeit) des Seitenastes l_s ; $Z_0 = 5 Z_4$ = Wellenwiderstand des Seitenastes, k_e = Endreflexionsfaktor im Seitenast. Erklärung von S im Text.

sich daraus, daß in diesem Fall die Pulse, die in den Seitenast hineingelaufen sind, umso früher wieder zur Abzweigungsstelle zurückkommen, je kürzer der Seitenast ist; somit werden auch die Pulsformänderungen im Hauptstamm umso weniger ausgeprägt sein, je kürzer der Seitenast ist; denn die Druckänderungen an der Stoßstelle werden umso früher teilweise rückgängig gemacht werden können, je kürzer die wellenlaufzeit im Seitenast ist. Auf diesen Einfluß der Länge eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm haben schon WETTERER und KENNER (1968, § 32) im Zusammenhang mit Verzweigungen im Arteriensystem hingewiesen.

4. Registrierungen im Arteriensystem und im Schlauchmodell mit Seitenast

4.1. Pulsregistrierungen im Arteriensystem

Die Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Wellenwiderstands-
verhältnissen, Längen und Endreflexionsfaktoren sollen nun anhand
von arteriellen Pulsen überprüft werden.

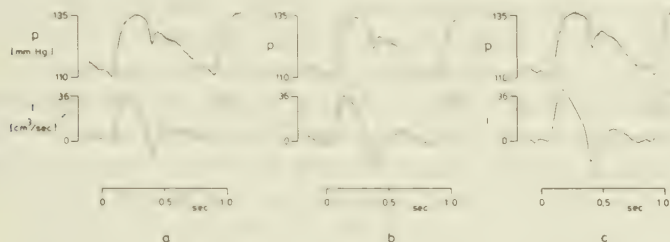


Abb.24 Druck (p) und Stromstärke (i) der Aorta descendens eines 23 kg schweren Hundes in Thiopentalnarkose. Druckregistrierung mit Katheterspitzenmanometer (Millar PC-350 A); Stromstärkeregistrierung mit elektromagnetischem Flowmeter (Statham SP 2202).

a) Kontrolle, b) nach Abklemmen der A.subclavia,
c) nach Abklemmen der A.subclavia und der A.anonyma.

In Abb.24 sind Druck (p) und Stromstärke (i) der Aorta descendens eines Hundes unmittelbar nach dem Abgang der A.subclavia wiedergegeben. Untersucht wurde der Einfluß der A.subclavia und der A.anonyma auf die Pulsformen der Aorta descendens. - Um den Einfluß der A. anonyma auf die Pulse der Aorta zu erfassen, darf man hier bei Abklemmversuchen wegen der meist rasch einsetzenden Regulation und der damit verbundenen Änderungen nur die Pulse direkt nach dem Abklemmen betrachten. Darauf wurde bei der Auswahl der Pulse in Abb.24c geachtet. - Nach dem Abklemmen der A.subclavia (Abb.24b) zeigt sich weder im Druck noch in der Stromstärke der Aorta descendens eine wesentliche Änderung. Erst beim zusätzlichen Abklemmen der A.anonyma (Abb.24c) nimmt sowohl die Druckamplitude als auch die Spitzenstromstärke zu; in den Pulsformen sind jedoch keine deutlichen Änderungen zu sehen, wenn man von den natürlicherweise vorhandenen Schwankungen von Puls zu Puls absieht. - Aus der Zunahme der Druckamplitude läßt sich bei

arteriellen Pulsen nicht der Reflexionsfaktor an dem Abgang eines Seitenastes nach Gleichung (41) ermitteln, wie dies weiter unten für den Reflexionsfaktor im Schließmodell am Abgang des Seitenastes geschieht, da sich zum Zeitpunkt des systolischen Druckmaximums in den arteriellen Pulsen wegen der starken Inhomogenität des Arteriensystems bereits hin- und rückläufige Pulse überlagern. Der einfache Zusammenhang zwischen den Druckamplituden mit und ohne Seitenast, wie er zur Aufstellung der Gleichung (46) vorausgesetzt ist, besteht im Arteriensystem nicht. - Nimmt man an, daß die Wellenwiderstandsverhältnisse der verschiedenen Arterien von Mensch und Hund vergleichbar sind, dann ergibt sich aus den Angaben von SNIDER et al. (1968) über menschliche Arterien für die Wellenwiderstände von Aortenbogen und A.anonyma ein Verhältnis von etwa 1 : 6 und für den Beginn der Aorta descendens und die A.subclavia ein Verhältnis von etwa 1 : 13. Ein Vergleich der am theoretischen Modell berechneten Pulse ohne Seitenast mit den Pulsen bei ähnlichen Wellenwiderstandsverhältnissen des Seitenastes zum Hauptstamm (Abb.20) führt praktisch zu den gleichen Ergebnissen wie die Abklemmversuche an den großen zentralen Seitenästen des Hundes.

MEISNER und REMINGTON (1962) haben gezeigt, daß das Abklemmen von Seitenästen der A.subclavia dextra auf die Pulse im Aortenbogen des Hundes praktisch keinen Einfluß hat. Dagegen zeigen sich nach dem Abklemmen der vier großen Seitenäste der A.subclavia (Abb.25b) und in noch stärkerem Maße nach dem zusätzlichen Abklemmen der A.subscapularis dextra (Abb.25c) in den Pulsen der A.axillaris dextra und der A.brachialis dextra sowohl systolisch als auch anfangsdiastolisch deutliche Änderungen.

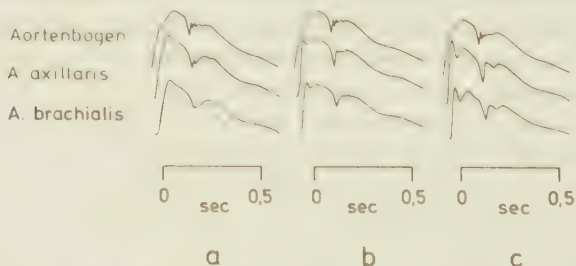


Abb.25 Druckregistrierungen am Hund. Die Registrierstellen sind neben den Pulskurven angegeben. a) Kontrolle, b) nach Abklemmen der A.omocervicalis, A.costocervicalis, A.thorac. int. und der A.vertebralis, c) zusätzliches Abklemmen der A.subscapularis (nach MEISNER und REMINGTON 1962).

Diese Befunde erscheinen nach den Ergebnissen der Berechnungen am theoretischen Modell plausibel. Zum einen ist das Wellenwiderstandsverhältnis zwischen der A.subclavia dextra und dem Aortenbogen wiederum so groß, daß die Rückwirkung des Seitenastes auf den Hauptstamm sehr klein ist. Außerdem spielt sicher auch hier die schon erwähnte "Abschirmung" der zentralen Meßstelle von Veränderungen in der Peripherie durch dazwischenliegende Reflexionsstellen eine Rolle. Zum anderen dürfte das Wellenwiderstandsverhältnis zwischen den vier Seitenästen, die von der A.subclavia aus als parallel geschaltet zu betrachten sind, und der A.subclavia sowie das Wellenwiderstandsverhältnis zwischen der A.subscapularis und der A.brachialis, deren Aufzweigung fast eine Bifurkation darstellt, so klein sein, daß entsprechend den Rückwirkungen des Seitenastes auf den Hauptstamm in Abb.20 die Veränderungen in den Pulsen in Abb.25b und c verständlich erscheinen.

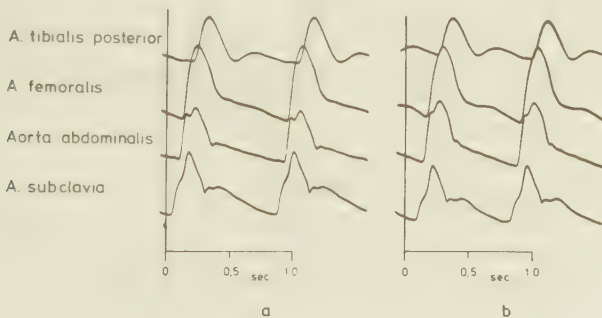


Abb.26 Sphygmogramme eines 29jährigen Mannes entlang dem arteriellen Hauptstamm. Die Registrierstellen sind neben den Pulskurven angegeben. Die Sphygmogramme sind mit gegeninduktiven mechanoelektrischen Wandlern aufgenommen. a) Kontrolle, b) nach Absperrung der beiden Oberarme mit auf 200 mmHg aufgeblasenen Manschetten.

In Abb.26 sind Sphygmogramme wiedergegeben, die an einer 29jährigen männlichen Versuchsperson aufgenommen wurden. Betrachtet man die Pulse der A.subclavia, so zeigt sich, daß eine Absperrung der Oberarme mit Manschetten - also eine Verkürzung des Seitenastes sowie eine starke Erhöhung des Endreflexionsfaktors - keinen deutlichen Einfluß auf die Pulsform hat, was zum einen wiederum auf den großen Unterschied im wellenwiderstand zwischen der A.subclavia und dem Aortenbogen zurück-

zuführen ist, zum anderen aber auch noch dadurch unterstützt werden dürfte, daß bei einer Verknüpfung des Seitenastes mit einer Vergrößerung des peripheren Reflexionsfaktors der Einfluß eines Seitenastes auf die Pulse im Hauptstamm kleiner und nicht größer wird. Da es sich bei den Arterien nicht um einen homogenen Seitenast handelt, wirkt sich obendrein auch hier wieder die "Abschirmung" der zentraleren Pulse von Veränderungen an den peripher gelegenen Arterien durch starke Zwischenreflexionsstellen aus.

Wegen des kleinen Verhältnisses der Wellenwiderstände von Aortenbogen und A. subclavia muß der Druckverlauf in der A. subclavia dem im Aortenbogen weitgehend entsprechen, da die Rückwirkung der A. subclavia auf den Druckverlauf im Aortenbogen sehr klein ist; der Aortenbogen wirkt also bezüglich der A. subclavia wie eine "weiche Pumpe", also eine Pumpe, die nicht die Stromstärke, sondern den Druck aufzwingt (s. WETTERER und KENNER (1968, S. 20)). Man kann somit den Puls der A. subclavia als Repräsentant für den Druck im Aortenbogen auffassen. Dieser Umstand ist für Betrachtungen der Pulse im arteriellen Hauptrohr, also der Aorta und deren Fortsetzungen in den Beinarterien, sehr nützlich (BAUER et al. (1973)).

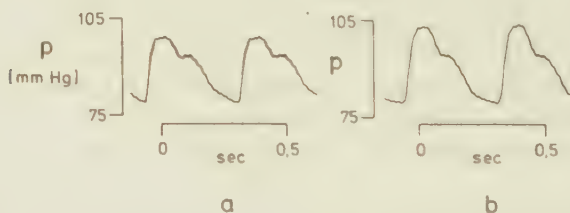


Abb. 27 Druckregistrierungen in der Aorta abdominalis des Hundes, 10 cm proximal der Aortentrifurkation.
a) Kontrolle, b) nach Abklemmen des zentralen Astes der Trifurkation (nach NEWMAN et al. (1973)).

NEWMAN et al. (1973) haben festgestellt, daß nach dem Abklemmen des zentralen Astes der Aortentrifurkation des Hundes die Druckamplitude 10 cm proximal der Aufzweigung deutlich zunimmt (Abb. 27), was bei den Dimensions- und den daraus abschätzbarer Wellenwiderstandsverhältnissen der zuführenden Bauchaorta und dem abgeklemmten zentralen Ast von ca. 1 : 3 durchaus plausibel ist und gut mit den Berechnungen am theoretischen Modell übereinstimmt.

An diesen Beispielen arterieller Pulse bei offenen und bei abgeklemmten Seitenästen zeigt sich, daß auch in der Berechnung an theoretischen Modell der tatsächliche Einfluß von Seitenästen auf die Pulse im Hauptstamm im Arteriensystem recht gut nachgeahmt werden kann.

4.2. Pulsregistrierungen im Schlauchmodell mit Seitenast

Bei allen hier durchgeführten Berechnungen wurden die Wellenwiderstände im Schlauchmodell als reell angenommen, d.h. es wurden alle Verluste, wie sie z.B. durch innere Wandreibung, innere Flüssigkeitsreibung oder durch Wirbelbildung in der strömenden Flüssigkeit auftreten, vernachlässigt. Der Einfluß der durch diese Verluste bewirkten Dämpfung und die Druck- und Strompulse im Arteriensystem bzw. in Schläuchen ist schon vielfach untersucht und diskutiert worden (HARDUNG (1962) und (1964), ANLIKER (1968), WETTERER und KENNER (1968) und KENNER (1972)). Es hat sich dabei gezeigt, daß in so relativ weiten Schläuchen wie den großen und mittleren Arterien die wesentliche Dämpfung durch die innere Wandreibung bewirkt wird, während die Flüssigkeitsreibung dagegen vernachlässigbar ist.

Von besonderem Interesse bei der Abzweigung von Seitenästen sind die Fragen, wie weit ein zusätzlicher Verlust durch diese Abzweigung auftritt und wie weit dieser Verlust von dem Winkel abhängt, unter dem ein Seitenast vom Hauptstamm abgeht. Ein Einfluß ist an sich deshalb zu erwarten, weil sich die Form der Stromlinien sowie die Ablösungszonen besonders bei pulsierender Strömung mit dem Abzweigungswinkel stark ändern (HARDUNG (1962), LING et al. (1969), ZELLER et al. (1970) und BRECH und BELLHOUSE (1973)).

4.2.1. Reflexionsfaktoren an der Abzweigung

Um festzustellen, wie groß der zusätzliche Verlust durch die Abzweigung ist, wurde der Reflexionsfaktor, der sich direkt aus den Pulsen ermitteln läßt, mit dem Reflexionsfaktor verglichen, der sich aus den Wellenwiderständen vom Hauptstamm und dem jeweiligen Seitenast ergibt. Es empfiehlt sich, die Rückwirkung des Seitenastes auf den Hauptstamm anhand des Reflexionsfaktors zu untersuchen, da er

sich bei diesem um eine relative Größe handelt; man muß also nicht absolut den Druck oder die Strömungsgeschwindigkeit messen, was in streng reproduzierbarer Weise wesentlich schwieriger und auch weniger genau wäre. Bei der Herleitung der Gleichung (25), mit deren Hilfe die Wellenwiderstände errechnet werden sollen, werden die bei einer Abzweigung immer auftretenden Kurven und Reflexionen nicht berücksichtigt. Es wäre somit zu erwarten, daß der direkt gemessene und hier berechnete Reflexionsfaktor voneinander abweichen. So erwähnte HARDUNG (1962) und (1964), daß nach seinen Messungen die einfachen Formeln (37), (38) und (39) zur Berechnung von Reflexionsfaktoren an Abzweigungen auf solche in hydrodynamischen Leitungen nicht anwendbar seien. MARTIN (1966) und vor allem SARPKYA (1967) haben darauf hingewiesen, daß der Einfluß zumindest bei Bifurkationen mit einem Verhältnis der Summe der beiden Querschnitte der weiterführenden Gefäße an einer Aufzweigung zum Querschnitt des zufführenden Stammes - in der englischsprachigen Literatur wird dieses Verhältnis als area ratio bezeichnet - von 1,02 bis 2,0 sehr klein ist. Diese Angaben von Querschnittsverhältnissen sind unzureichend, da nicht der Querschnitt an sich, sondern der auch von anderen Größen abhängige Wellenwiderstand die Wellenleitung charakterisiert.

Zur Ermittlung der Reflexionsfaktoren aus den Druckpulsen wurde der Druck 10 cm hinter der Abzweigung (p₂ in Abb.12) seiteständig im Hauptstamm einmal bei offenem Seitenast und einmal bei abgeklammtem Seitenast gemessen. Zur Berechnung der Reflexionsfaktoren läßt sich die Gleichung (41) unmittelbar auf die Druckpulse im Schlauchmodell anwenden, da bei der Auswahl der Laufzeiten im Modell darauf geachtet wurde, daß zum Zeitpunkt des Druckmaximums in den Pulsen mit bzw. ohne Seitenast noch keine reflektierten, wieder zentralwärts laufenden Pulse auftreten können. Es beträgt die Zeit bis zum Druckmaximum in beiden Pulsen 130 msec; die Laufzeiten im weiterführenden Hauptstamm bis zum Endwiderstand sowie im Seitenast bis zu dessen peripherem Widerstand sind kleiner mit 109 bzw. 111 msec so groß (vgl. Tab.2), daß die dort reflektierten und wieder zentralwärts laufenden Wellen erst viel später an den Druckregistrierstellen eintreffen als der Gipfel des Primärpulses. Es handelt sich also bei den beiden Druckmaxima nur um peripherwärts laufende Druckpulse.

Das Dehnungsverhalten der im Schlauchmodell verwendeten Gummischläuche ist nicht linear. Um störende Einflüsse, die durch solche

wurde darauf geachtet, daß der Mitteldruck im Schlauchsystem immer konstant gleich 35 cm Wasser war und nur mit sehr kleinen Druckamplituden von ca. 5 bis 7 mmHg gearbeitet wurde.

In Abb.28 ist ein Registrierbeispiel für Pulse des Schlauchmodells ohne Seitenast an der Stelle p_1 wiedergegeben.

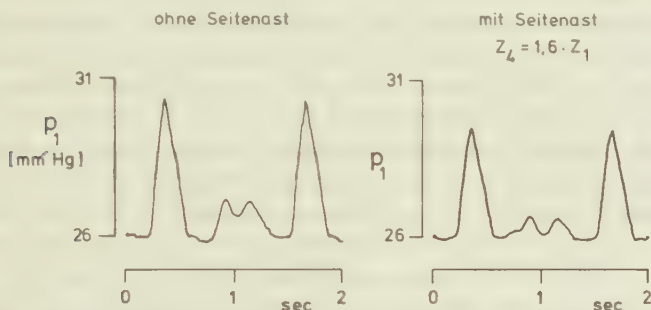


Abb. 28 Druckregistrierungen distal der Aufzweigung im Schlauchmodell nach Abb.12 ohne und mit Seitenast I. Z_1 = Wellenwiderstand des Hauptstammes, Z_4 = Wellenwiderstand des Seitenastes.

Aufgrund des negativen Reflexionsfaktors ist die Druckamplitude bei offenem Seitenast kleiner als im Modell ohne Seitenast. Der aus den beiden Druckamplituden mittels der Gleichung (41) errechnete Reflexionsfaktor k_1 ist sowohl für das Modell mit dem Seitenast I als auch für das Modell mit dem Seitenast II in Tab.3 eingetragen. Nimmt man den Meßfehler für den Druck zu 5% an, dann kommt man auf einen Fehler bei der Bestimmung von k_1 von 10%.

Tabelle 3. Reflexionsfaktoren für peripherwärts laufende Pulse an der Abzweigung, ermittelt aus den Druckpulsen (k_1) bzw. aus den Wellenwiderständen (k_2) ohne Berücksichtigung der Verluste durch Reibung.

	Modell mit Seitenast I	Modell mit Seitenast II
k_1	-0,230±10%	-0,092±10%
k_2	-0,238±20%	-0,101±20%

Ein durch die Abzweigung bedingter zusätzlicher Verlust müßte sich darin äußern, daß die Beträge dieser Reflexionsfaktoren kleiner sind als die nach Gleichung (37) direkt aus den Wellenwiderständen errechneten. Um die Wellenwiderstände nach Gleichung (37) zu ermitteln, benötigt man jeweils den Schlauchquerschnitt q und die Pulswellengeschwindigkeit c ($g_{H_2O} = 1,0$). Zur Bestimmung von c wurden an den Schläuchen des Hauptstammes und der Seitenäste je zwei Pulse in einem Abstand von 10 cm gleichzeitig registriert und die Laufzeit zwischen diesen Pulsen gemessen. Sowohl die gemessenen c als auch die nach Gleichung (25) errechneten Wellenwiderstände der drei Schläuche sind in Tab.2 eingetragen.

Bei diesen Pulswellengeschwindigkeiten handelt es sich entsprechend der Bestimmungsmethode um Frontgeschwindigkeiten, d.h. um die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der ersten Anstiege der Pulse. Es ist, wie KAPAL et al. (1951) und WETTERER und KENNER (1968) gezeigt haben, günstiger, anstelle der Phasengeschwindigkeit einer höheren Harmonischen der Pulse die Frontgeschwindigkeit in Gleichung (25) einzusetzen, da auf diese Weise eine "praktisch nützliche Mittelstellung" zwischen dem reell angenommenen Wellenwiderstand und dem komplexen Wellenwiderstand - etwa nach Formel (26) - erreicht wird.

Durch Einsetzen dieser Wellenwiderstände in Gleichung (37) erhält man die Reflexionsfaktoren k_2 an der Abzweigung für im Hauptstamm peripherwärts laufende Pulse; diese sind ebenfalls in Tab.3 aufgeführt. Vernachlässigt man die Ungenauigkeit der Messung der Schlauchquerschnitte, dann errechnet sich der Fehler von k_2 aus den Fehlern bei der Bestimmung der Pulswellengeschwindigkeiten zu 20%. Diese Fehler bestehen grundsätzlich, wenn man die Frontgeschwindigkeit zur Ermittlung der Geschwindigkeit der Pulswelle heranzieht. Die beiden Pulse, deren Anstiege verglichen werden sollen, dürfen nicht allzuweit auseinander liegen, wodurch die Laufzeit zwischen den beiden Punkten nur sehr ungenau zu bestimmen ist. Will man die Laufzeit genauer bestimmen, so muß man zwei weiter voneinander entfernt liegende Registrierstellen wählen. Hier sind dann aber aufgrund der Wellendämpfung und -dispersion die beiden Anstiege nicht mehr direkt miteinander zu vergleichen, was wiederum zu den gleichen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Pulswellengeschwindigkeit führt. Es zeigt sich, daß die Ungenauigkeit der Bestimmung der Reflexionsfaktoren k_2 weit größer ist als die Abweichungen der auf die beiden

Arten bestimmten Reflexionsfaktoren voneinander, sodass eine Aussage darüber nicht möglich ist, ob die mit der Gleichung (37) errechneten k_2 oder die aus den Pulsen direkt ermittelten k_1 größer oder kleiner sind.

Der Einwand von HARDUNG (1962), man könnte die Formeln (37), (38) und (39) an Abzweigungen von hydrodynamischen Wellenleitungen nicht anwenden, ist somit hinfällig. Die Abweichungen, die durch zusätzlich auftretende Verluste infolge von Wirbeln und unterschiedlichen Ablösungszonen an dem Abgang eines Seitenastes hervorgerufen werden, sind so gering, daß sie unter der Meßgenauigkeit für z.B. die Puls- wellengeschwindigkeit liegen. Diese einfachen Formeln sind deshalb ein durchaus geeignetes Mittel, um Stoßfaktoren an Abzweigungen zu berechnen, und die Folgerungen aus den Berechnungen in Kap. 3.1. sind auch für Schlauchmodelle und große bis mittlere Arterien gültig.

4.2.2. Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit vom Winkel der Abzweigung

Um den Einfluß des Winkels, unter dem ein Seitenast von einem Hauptstamm abzweigt, auf die Verhältnisse in dieser Wellenleitung mit Abzweigung zu untersuchen, wurden die Reflexionsfaktoren an der Aufzweigungsstelle in den Schlauchmodellen mit fünf verschiedenen Abgangswinkeln bestimmt; und zwar wurden Winkel von 30° , 60° , 90° , 120° und 150° zwischen der Achse des weiterführenden Hauptstammes und der des Seitenastes eingestellt und untersucht. Die Ergebnisse der Messungen mit den Seitenästen I und II sind in Abb.29 wiedergegeben. Die horizontalen Geraden sind jeweils durch die arithmetischen Mittelwerte aus den 5 Meßwerten gezeichnet. Aus diesen Werten läßt sich nicht ablesen, daß der an der Aufzweigung auftretende Widerstand bei 90° am kleinsten sein soll und daß dieser mit abnehmendem Winkel zwischen den Achsen des peripheren Hauptstammes und des Seitenastes zunehmen soll, wie KENNEDY et al. (1974) gefunden haben. Der Einfluß des Abzweigungswinkels auf den Reflexionsfaktor an der Abgangsstelle eines Seitenastes - der sicherlich vorhanden ist - ist kleiner als die Ungenauigkeiten der Druckmessung, die zum einen durch die unvermeidlichen kleinen Druckschwankungen wegen des nicht ganz gleichmäßigen Pumpenlaufs hervorgerufen werden und zum anderen dadurch bedingt sind, daß wegen des Rauschens des Bandgerätes die Genauigkeit der Druckmessung prinzipiell begrenzt ist.

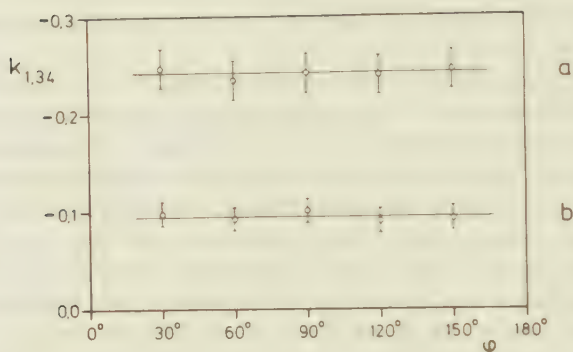


Abb. 29 Reflexionsfaktoren $k_{1,34}$ für Pulswellen, die im Hauptstamm geradgerad auf die Abzweigung treffen, in Abhängigkeit vom Winkel (φ) zwischen der Achse des weiterführenden Hauptstammes und der des Seitenastes.

- a) im Schlauchmodell mit dem Seitenast I.
- b) im Schlauchmodell mit dem Seitenast II.

Es sei hier noch erwähnt, daß eine Untersuchung der Winkelabhängigkeit unter 30° bzw. über 150° zwischen den Achsen von Hauptstamm und Seitenast, wie sie von KENNEDY et al. (1974) angegeben ist, mit der beschriebenen Versuchsanordnung nicht sinnvoll gewesen wäre, da ein Zwischenstück für eine derartige Abzweigung ohne Änderung des Querschnittes des Seitenastes zu lang wurde, daß dessen Einfluß auf die Wellenvorgänge im Schlauchmodell nicht mehr vernachlässigt werden dürfte. Tatsächlich ist eine solche Untersuchung auch nicht notwendig, da im Arteriensystem keine Abzweigungen mit solchen extremen Winkeln auftreten.

Auch die Messungen an den Druckpulsen 10 cm distal der Abzweigung im Seitenast (p_2 in Abb. 17) ließen keine eindeutige Abhängigkeit z.B. der Druckamplitude vom Winkel der Aufzweigung erkennen; auf eine Darstellung dieser Messungen wurde verzichtet.

Eine der Konsequenzen aus der Unabhängigkeit des Reflexionsfaktors vom Winkel, unter der ein Seitenast vom Hauptstamm abzweigt, ist folgende. Eine häufig angewandte chirurgische Korrektur von Stenosen

und Verschlüssen z.B. im Bereich der großen Aortenbogenäste und der Koronararterien besteht im Anlegen eines Bypasses, d.h. einer Überbrückung des stenosierter bzw. verschlossenen Gebietes mit einem Gefäßtransplantat. Nur wurde im Zusammenhang damit die Frage erörtert (KENNELLY et al. (1974), VOGEL et al. (1975)), unter welchem Winkel das Transplantat z.B. bei einem aorto-koronaren Bypass, bei dem eine Stenose oder ein Verschuß einer Koronararterie, ausgehend von der Aorta ascendens, mit einer Beinvene überbrückt wird, in die Aorta bzw. die distal der Stenose gelegene Stelle der Koronararterie angenäht werden sollte, um einen möglichst geringen Druckabfall an dieser Abzweigungsstelle zu erhalten. Da der Winkel keinen meßbaren Einfluß auf den Druck- und somit auch auf den Stromstärkeverlauf an einer solchen Stelle hat, erübrigen sich solche Diskussionen. Der Einfluß der Krümmungen und Kurven an Abzweigungen auf die Pulsformen ist offensichtlich viel zu klein, als daß er für den Druck oder die Stromstärke in hydrodynamischen Wellenleitungen eine wesentliche Rolle spielen könnte.

5. Zusammenfassung

Der Einfluß eines Seitenastes auf Druck und Stromstärke im zugehörigen Hauptstamm wird mit Hilfe eines theoretischen und eines physischen Schlauchmodells untersucht. Das theoretische Modell ist ein dämpfungsfreies, ein- oder mehrgliedriges Schlauchmodell mit einem ein- oder mehrgliedrigen Seitenast, das pulsierend durchströmt werden kann. Das FORTRAN-Programm, das das Modell beinhaltet und das die Berechnung von Druck- und Strompulsen an jeder beliebigen Stelle des Modells gestattet, wird angegeben. Mit Hilfe des theoretischen Modells wird der Einfluß eines Seitenastes auf die Pulsformen im Hauptstamm, mit Hilfe des physischen Schlauchmodells die Wirkung von Wirbeln und Ablösungszonen im Bereich des Abgangs eines Seitenastes auf den Reflexionsfaktor an der Abzweigungsstelle und der Einfluß des Abgangswinkels auf Druck- und Strompulse im Hauptstamm untersucht. Da kein grundsätzlicher Unterschied zwischen den Pulsen im ungedämpften theoretischen Modell und denen im physischen, mit Dämpfung behafteten Schlauchmodell besteht, sind die am theoretischen Modell gewonnen Aussagen auch auf das Schlauchmodell und das Arteriensystem anwendbar.

Es ergibt sich, daß ein Einfluß eines Seitenastes auf die Pulsformen des Hauptstammes praktisch nicht mehr feststellbar ist, wenn der Wellenwiderstand eines Seitenastes mehr als 15mal so groß ist wie der Wellenwiderstand des Hauptstammes. Der Einfluß eines einzelnen Seitenastes auf die Pulse im Hauptstamm ist weiterhin umso kleiner, je größer der Endreflexionsfaktor des Seitenastes (bei konstanter Länge) und je kürzer der Seitenast (bei konstantem Endreflexionsfaktor) ist. Der Einfluß von Wirbeln und Ablösungszonen aufgrund der Krümmungen an der Abzweigung auf die Pulsformen im Hauptstamm ist so gering, daß er innerhalb des durch die Meßgenauigkeit gegebenen Bereiches liegt, d.h. Wirbel und Ablösungszonen haben keinen meßbaren Einfluß auf die Reflexionsfaktoren an der Abzweigung. Das gleiche gilt für die Rückwirkung des Abgangswinkels des Seitenastes auf die Druck- und Strompulse im Hauptstamm in einem Bereich von 30° bis 150° . Auf die Bedeutung dieses Befundes für die Gefäßchirurgie wird hingewiesen.

Es wird gezeigt, daß sich die an den Modellen gefundenen Zusammenhänge sehr gut an Pulsregistrierungen an Mensch und Tier verifizieren lassen.

PAGE 0001

(FTN4--RELEASE 2417/0--JULY, 1971)

```

0001 FTN4,L
0002 PROGRAM PULS(3)
0003 C
0004 C =====
0005 C
0006 C PROGRAMM ZUR BERECHNUNG EINES DRUCK- ODER STROMPULSES
0007 C IN EINEM SCHLAUCHMODELL MIT SEITENAST
0008 C
0009 C =====
0010 C
0011 C HARDWARE:
0012 C HP 2100 A, DOS-M, 16 K
0013 C X-Y-DISPLAY LIBRARY, DVR 13
0014 C
0015 C ERKLAERUNG DER VARIABLEN UND FELDER
0016 C
0017 C VARIABLE 11 = LAENGE DES HAUPTSTAMMES
0018 C 12 = LAENGE DES SEITENASTES
0019 C 13 = LAENGE DES PRIMAERPULSES
0020 C 14 = GESAMTLAENGE DES PULSES
0021 C 1LA= LAENGE DES PULSES IM STATIONAEREN ZUSTAND
0022 C Z1 = WELLENWIDERSTAND DES HAUPTSTAMMES
0023 C Z3 = WELLENW. DES WEITERFUEHRENDEN H.-STAMMES
0024 C Z4 = WELLENW. DES SEITENASTES
0025 C J1 = STELLE DER PULSKONSTRUKTION
0026 C K = ABGANG DES SEITENASTES
0027 C RZ = REFLEXIONSFAKTOR FUER RUECKLAEUFIGE
0028 C PULSE IM HAUPTSTAMM
0029 C
0030 C FELDER U = PRIMAERPULS
0031 C A = MULTIPLIKATOREN IM HAUPTSTAMM
0032 C B = MULTIPLIKATOREN IM SEITENAST
0033 C R1 = REFLEXIONSFAKTOREN IM HAUPTSTAMM
0034 C R2 = REFLEXIONSFAKTOREN IM SEITENAST
0035 C P = DRUCK- BZW. STROMPULS
0036 C
0037 C
0038 C
0039 C
0040 C DIMENSION IK(300),ISEG(3),IA(3)
0041 C COMMON P(1001),I4,ILA,LAB2,J1,K,IV,U(90),R1(80)
0042 C COMMON R2(30),I1,I2,I3,Z1,Z3,Z4,AJK,LAB1,IJZ
0043 C DATA ISEG/2HPU,2HLS,2H1 /
0044 C
0045 C ASSIGN 1500 TO LAB1
0046 C ASSIGN 1010 TO LAB2
0047 C
0048 C
0049 C EINGABE DER PARAMETER
0050 C
0051 C WRITE(1,1000)
0052 1000 FORMAT("GESAMTLAENGE DES PULSES : ")
0053 READ(1,*) I4

```

PAGE 0002 PULS

(FTN4--RELEASE 241772--JULY, 1971)

```

0054      WRITE(1,1005)
0055 1005  FORMAT("LAENGE DES PULSES IM STATIONAEREN ZUSTAND : -")
0056      READ(1,*) ILA
0057      WRITE(1,1031)
0058 1031  FORMAT("PUNKTABSTAND DER MULTIPLIKATOREN (IN MSEC) : -")
0059      READ(1,*) K10
0060      K10=K10*2
0061      WRITE(1,1020)
0062 1020  FORMAT("URPULS - WOHER (ASCII-FILE) : -")
0063      READ(1,1025) IA
0064 1025  FORMAT(3A2)
0065      WRITE(1,1030)
0066 1030  FORMAT("SEKTOR-NR.; LAENGE; PUNKTABSTAND (IN MSEC) : -")
0067      READ(1,*) ISEC,I3,K20
0068      ILU=-6*I3
0069      IJZ=K10/K20
0070  C
0071  C  EINLESEN DES URPULSES VON EINEM PLATTEN-FILE
0072  C
0073      CALL EXEC(14,2,IK,ILU,IA,ISEC)
0074      CALL CODE
0075      READ(1K,1035)(U(N),N=1,I3)
0076 1035  FORMAT(F6.4)
0077  C
0078      WRITE(1,2000)
0079 2000  FORMAT("ABGANG DES SEITENASTES BEI : -")
0080      READ(1,*) K
0081      WRITE(1,2005)
0082 2005  FORMAT("KONSTRUKTIONSORT; HAUPTSTAMM=0, SEITENAST=1 -")
0083      READ(1,*) J1,IV
0084      DO 1040 I=1,80
0085 1040  R1(I)=0.0
0086      DO 1045 I=1,30
0087 1045  R2(I)=0.0
0088  C
0089 1055  WRITE(1,1050)
0090 1050  FORMAT("HAUPTSTAMM - REFL.ORT; REFL.FAK.; 1=NOCH : -")
0091      READ(1,*) IC,RA,IL
0092      R1(IC)=RA
0093      IF(IL.EQ.1) GOTO 1055
0094      I1=IC
0095  C
0096 1065  WRITE(1,1060)
0097 1060  FORMAT("SEITENAST - REFL.ORT; REFL.FAK.; 1=NOCH : -")
0098      READ(1,*) IC,RA,IL
0099      R2(IC)=RA
0100      IF(IL.EQ.1) GOTO 1065
0101      I2=IC
0102  C
0103      WRITE(1,1070)
0104 1070  FORMAT("WELLENWIDERST. AN DER ARZWEIGUNG : Z1; Z3; Z4 : -")
0105      READ(1,*) Z1,Z3,Z4
0106  C

```

PAGE 0003 PULS (FTN4--RELEASE 24177B--JULY, 1971)

```
0107 C AJK DIENST ZUR UNTERSCHIEDUNG, OB EIN DRUCK- ODER EIN STROM-
0108 C PULS KONSTRUIERT WERDEN SOLL
0109 C
0110 C AJK=R1(I1)/ABS(R1(I1))
0111 C
0112 C AUFRUF DES 1. SEGMENTES
0113 C
0114 C CALL EXEC(8,ISEG)
0115 C
0116 C AUFRUF DES 2. SEGMENTES
0117 C
0118 1500 ISEG(3)=2H2
0119 CALL EXEC(8,ISEG)
0120 C
0121 1010 CONTINUE
0122 END
```

** NO ERRORS*

PAGE 0004 PULS (FTN4--RELEASE 24177B--JULY, 1971)

```
0123 ENDS
ND,FTN4
```

PAGE 0001

(FTN4--RELEASE 24177B--JULY, 1971)

```

0001 FTN4,L
0002 PROGRAM PULS1(5)
0003 C
0004 C BERECHNUNG DER PRIMÄERPULSMULTIPLIKATOREN
0005 C UND DES EINZELPULSES
0006 C
0007 C
0008 DIMENSION A(4,80),B(4,30)
0009 COMMON P(1001),I4,ILA,LAB2,J1,K,IV,U(90),R1(80)
0010 COMMON R2(30),I1,I2,I3,Z1,Z3,Z4,AJK,LAB1,IJZ
0011 DATA A,B/440*0.0/
0012 C
0013 DO 1000 I=1,1001
0014 1000 P(I)=0.0
0015 C
0016 ZGES=Z4*Z3/(Z4+Z3)
0017 ZGEL=Z1*Z3/(Z1+Z3)
0018 ZGER=Z1*Z4/(Z1+Z4)
0019 C
0020 C BERECHNUNG DER REFLEXIONSFAKTOREN AN DER ABZWEIGUNG
0021 C
0022 R1(K)=(1.-Z1/Z3-Z1/Z4)/(1.+Z1/Z3+Z1/Z4)*AJK
0023 R2(2)=(1.-Z4/Z3-Z4/Z1)/(1.+Z4/Z3+Z4/Z1)*AJK*(-1.0)
0024 KZ=(-1.0)*(1.-Z3/Z4-Z3/Z1)/(1.+Z3/Z4+Z3/Z1)*AJK
0025 IJK=IFIX(AJK+1.)
0026 C
0027 A(2,1)=1.0
0028 C
0029 DO 2000 I=3,I1
0030 IF(IJK.EQ.2) GOTO 1999
0031 IF(I.NE.K) GOTO 1999
0032 A(2,K)=(ZGES/Z3)*A(2,K-1)*(1.+R1(K))
0033 GOTO 2000
0034 1999 A(2,I)=A(2,I-1)*(1.+R1(I))
0035 2000 CONTINUE
0036 C
0037 IF(IJK.EQ.2) GOTO 3097
0038 B(2,2)=(ZGES/Z4)*A(2,K-1)*(1.+R1(K))
0039 GOTO 3098
0040 3097 B(2,2)=A(2,K-1)*(1.+R1(K))
0041 C
0042 3098 DO 2001 I=3,I2
0043 2001 B(2,I)=B(2,I-1)*(1.+R1(I))
0044 C
0045 IF(IV.EQ.1) GOTO 2002
0046 C
0047 DO 2003 I=1,I3,IJZ
0048 P(I)=U(I)*A(2,J1)
0049 IF(IJZ.EQ.1) GOTO 2003
0050 P(I+1)=U(I+1)*A(2,J1)
0051 2003 CONTINUE
0052 GOTO 2004
0053 C

```

PAGE 0002 PULS1

(FTN4--RELEASE 241778--JULY, 1971)

```

0004 DO 2005 I=1,I3,IJZ
0005 P(I)=J(I)*B(2,J1)
0006 IF(IJZ.EQ.1) GOTO 2005
0007 P(I+1)=U(I+1)*B(2,J1)
0008 2005 CONTINUE
0009 C
0010 2004 DO 3000 JK=2,I4
0011 C
0012 C PRIMAERPULSMULTIPLIKATOREN DES HAUPTSTAMMES
0013 C
0014 DO 3001 I=2,I1
0015 IF(I.EQ.K-1) GOTO 3002
0016 IF(I.EQ.K) GOTO 3001
0017 A(3,I)=A(1,I+1)*(1.-R1(I+1))+A(2,I)*R1(I+1)
0018 A(4,I)=A(4,I-1)*(1.+R1(I))+A(3,I)*(-R1(I))
0019 A(1,I)=A(3,I)
0020 A(2,I)=A(4,I)
0021 IF(IV.EQ.0) 3050,3001
0022 3050 IF(I.NE.J1) GOTO 3001
0023 3055 A(4,I)=A(4,I)+A(3,I)
0024 C
0025 C PULS IM HAUPTSTAMM
0026 C
0027 DO 3051 J=1,I3,IJZ
0028 L=J+JK-1
0029 IF(L.GT.I4) GOTO 3052
0030 P(L)=P(L)+U(J)*A(4,I)
0031 IF(IJZ.EQ.1) GOTO 3051
0032 P(L+1)=P(L+1)+U(J+1)*A(4,I)
0033 3051 CONTINUE
0034 3052 A(4,I)=A(4,I)-A(3,I)
0035 C
0036 3001 CONTINUE
0037 C
0038 C PRIMAERPULSMULTIPLIKATOREN DES SEITENASTES
0039 C
0040 DO 3004 JJ=3,I2
0041 A(3,JJ)=A(1,JJ+1)*(1.-R1(JJ+1))+A(2,JJ)*R1(JJ+1)
0042 A(4,JJ)=A(4,JJ-1)*(1.+R1(JJ))+A(3,JJ)*(-R1(JJ))
0043 B(1,JJ)=B(3,JJ)
0044 B(2,JJ)=B(4,JJ)
0045 IF(IV.EQ.1) 3013,3004
0046 3013 IF(JJ.NE.J1) 3004,3014
0047 3014 B(4,J1)=B(4,J1)+B(3,J1)
0048 C
0049 C PULS IM SEITENAST
0050 C
0051 DO 3030 J=1,I3,IJZ
0052 L=J+JK-1
0053 IF(L.GT.I4) GOTO 3040
0054 P(L)=P(L)+U(J)*A(4,J1)
0055 IF(IJZ.EQ.1) GOTO 3030
0056 P(L+1)=P(L+1)+U(J+1)*A(4,J1)

```

PAGE 0003 PULS1 (FTN4--RELEASE 241773--JULY, 1971)

```

0107 3030 CONTINUE
0108 3040 B(4,J1)=B(4,J1)-B(3,J1)
0109 IF(J1.EQ.2) GOTO 30J1
0110 C
0111 3004 CONTINUE
0112 C
0113 3000 CONTINUE
0114 C
0115 C RUECKSPRUNG INS HAUPTPROGRAMM
0116 C
0117 GOTO LAB1
0118 C
0119 C PRIMAERPULSMULTIPLIKATOREN AN DER ABZWEIGUNG
0120 C
0121 3002 IF(IJK.EQ.2) GOTO 3093
0122 A(3,K-1)=(ZGER/Z1)*A(1,K)*(1.-R2)+A(3,K-1)*R1(1)
0123 1 +(ZGEL/Z1)*B(1,2)*(1.-R2(2))
0124 GOTO 3091
0125 3090 A(3,K-1)=A(1,K)*(1.-RZ)+A(2,K-1)*R1(K)+B(1,2)*(1.-R2(2))
0126 3091 A(4,K-1)=A(4,K-2)*(1.+R1(K-1))+A(3,K-1)*(-R1(K-1))
0127 A(1,K-1)=A(3,K-1)
0128 A(2,K-1)=A(4,K-1)
0129 B(3,2)=B(1,3)*(1.-R2(3))+B(2,2)*R2(3)
0130 A(3,K)=A(1,K+1)*(1.-R1(K+1))+A(2,K)*R1(K+1)
0131 IF(IJK.EQ.2) GOTO 3092
0132 B(4,2)=(ZGES/Z4)*A(3,K-1)*(1.+R1(K))+B(3,2)*(-R1(K))
0133 2 +(ZGER/Z4)*A(3,K)*(1.-RZ)*(1.0)
0134 GOTO 3093
0135 3092 B(4,2)=A(4,K-1)*(1.+R1(K))+B(3,2)*(-R2(2))+A(3,K)*(1.-RZ)
0136 3093 B(1,2)=B(3,2)
0137 B(2,2)=B(4,2)
0138 IF(IJK.EQ.2) GOTO 3095
0139 A(4,K)=(ZGES/Z3)*A(4,K-1)*(1.+R1(K))+A(3,K)*(-RZ)
0140 3 +(ZGEL/Z3)*B(3,2)*(1.-R2(2))*(-1.0)
0141 GOTO 3096
0142 3095 A(4,K)=A(4,K-1)*(1.+R1(K))+A(3,K)*(-RZ)+B(3,2)*(1.-R2(2))
0143 3096 A(1,K)=A(3,K)
0144 A(2,K)=A(4,K)
0145 C
0146 IF(IV.EQ.1) 3012,3070
0147 3012 IF(J1.EQ.2) 3014,3001
0148 3070 IF(K-1.EQ.J1) 3050,3072
0149 3072 IF(K.EQ.J1) 3055,3001
0150 C
0151 8401 CALL PULS
0152 END

```

** NO ERRORS*

PAGE 0004 PULS1 (FTN4--RELEASE 24177B--JULY, 1971)

0153 ENDS

PAGE 0001

(FTW4--RELEASE 241775--JULY, 1971)

```

0001 FTW4,L
0002
0003 C
0004 C   BERECHNUNG DES PULSES IM STATIONAEREN ZUSTAND, DARSTELLEN DES
0005 C   PULSES AUF DEM DISPLAY UND ABSPEICHERN DES PULSES AUF DER
0006 C   PLATTE
0007 C
0008 C
0009     DIMENSION IB(3),IRU(2000)
0010     COMMON P(1001),I4,ILA,LAR2,J1,K,IV
0011     COMMON ID(413)
0012     EQUIVALENCE(IRU(1),ID(1))
0013 C
0014 C   PULS IM STATIONAEREN ZUSTAND
0015 C
0016     IM=I4/ILA+1
0017     N=ILA-1
0018 C
0019     DO 1001 M=1,IM
0020     IJ=I4-M*N
0021     DO 1001 L=1,IJ
0022     P(L+M*N)=P(L+M*N)+P(L)
0023     JJ=L+M*N
0024     IF(JJ.EQ.I4) GOTO 1003
0025 1001 CONTINUE
0026 C
0027 1003 KA=I4-ILA
0028     KB=I4
0029     PMAX=P(KA)
0030     PMIN=P(KB)
0031     DO 4000 LL=KA+1,KB
0032     IF(P(LL).GT.PMAX) PMAX=P(LL)
0033     IF(P(LL).LT.PMIN) PMIN=P(LL)
0034 4000 CONTINUE
0035 C
0036     WRITE(1,4001) PMAX,PMIN
0037 4001 FORMAT("P MAX : ",F6.4,2X,"P MIN : ",F6.4)
0038 C
0039 C   DARSTELLEN DES PULSES AUF DEM DISPLAY
0040 C
0041     CALL SCOPE(1BU,1000)
0042     CALL UNIT(8)
0043 2002 WRITE(1,2004)
0044 2004 FORMAT("MASSTAB; HOEHE : -")
0045     READ(1,*) Z1,I1Y
0046     CALL BOUND(1F01)
0047     IX=1
0048     DO 2000 J=1,250
0049     IY=J
0050 2000 CALL POINT(IX,IY)
0051     DO 2001 JI=1,250
0052     IIX=JI
0053 2001 CALL POINT(IIX,I1Y)

```

PAGE 0002 PULS2 (FTN4--RELEASE 241773--JULY, 1971)

```

0054      DO 2003 KKI=1,251
0055      IX=KKI
0056      L=KA-151+KKI
0057      IY=(P(L)*Z1+1.5)+IIY
0058 2003   CALL POINT(IX,IY)
0059      CALL BOUND(IFO2)
0060      WRITE(1,2005)
0061 2005   FORMAT("GUT = 1 : -")
0062      READ(1,*) IS
0063      IF(IS.EQ.1) GOTO 3000
0064      CALL PURGE(IFO1,IFO2)
0065      GOTO 2002
0066 3000   CALL DIOFF
0067      C
0068      C  ABSPEICHERN DES PULSES AUF EINEM ASCII-FILE
0069      C
0070      WRITE(1,3030)
0071 3030   FORMAT("ABSPEICHERN EINES STATIONAEREN PULSES = 1 : -")
0072      READ(1,*) NN
0073      IF(NN.EQ.1) GOTO 3040
0074      WRITE(1,3010)
0075 3010   FORMAT("ABSPEICHERN DER PULSKURVE VON N1 BIS N2 : -")
0076      READ(1,*) KA,KB
0077      ILE=-6*(KB-KA)
0078      GOTO 3050
0079 3040   ILE=-6*ILA
0080 3050   WRITE(1,1004)
0081 1004   FORMAT("PULS - WOHIN (ASCII-FILE) : -")
0082      READ(1,1005) IR
0083 1005   FORMAT(3A2)
0084      WRITE(1,1090)
0085 1090   FORMAT("SEKTOR-NR.: -")
0086      READ(1,*) ISE
0087      KC=KB-KA
0088      DO 1092 I=1,KC
0089      J=I-1
0090 1092   P(I)=P(KA+J)
0091      C
0092      CALL CODE
0093      WRITE(1BU,1091)(P(N),N=1,KC)
0094 1091   FORMAT(F6.4)
0095      CALL EXEC(15,2,1BU,ILE,IR,ISE)
0096      C
0097      C  RUECKSPRUNG INS HAUPTPROGRAMM
0098      C
0099      GOTO LAB2
0100 7531   CALL PULS
0101      END

```

** NO ERRORS*

PAGE 0003 PULS2 (FTN4--RELEASE 241773--JULY, 1971)

Abkürzungen und Symbole

a, b, c	laufende Indizes
A, B, C, D	Bezeichnung für Pulse
c	Pulswellengeschwindigkeit (cm/sec)
C'	Compliance (elastische Weitbarkeit) pro Längeneinheit (cm ⁴ /dyn) bzw. (elektrisch) Kapazität pro Längeneinheit (Farad/cm)
e	als Index bedeutet "End-"
G'	Leitwert pro Längeneinheit (cm ⁴ /(dyn·sec)) bzw. (elektrisch) (Siemens/cm)
i, I	Stromstärke (cm ³ /sec) bzw. (elektrisch) (Ampere)
i	als Index bedeutet "Eingangs-"
j	= (-1) ^{1/2}
k, k _{a, bc}	Reflexionsfaktoren
l	Laufzeit (msec)
l	als Index bedeutet "Längs-"
L'	Induktivität pro Längeneinheit (Henry/cm)
M'	wirksame Masse pro Längeneinheit (g/cm ⁵)
p, P	Druck (mmHg) oder (dyn/cm ²) oder (cm Wasser)
q	Ladung (Coulomb)
q	als Index bedeutet "Quer-"
Q	Querschnitt (cm ²)
R'	Strömungswiderstand pro Längeneinheit (dyn·sec/cm ⁶) bzw. (elektrisch) Widerstand pro Längeneinheit (Ohm/cm)
R' _w	innere Wandreibung mal Längeneinheit (dyn·sec/cm ⁴) bzw. (elektrisch) Querwiderstand mal Längeneinheit (Ohm·cm)
s	als Index bedeutet "Seitenast"
S	Summe der Absolutwerte der Differenzen zwischen den einzelnen Punkten zweier in digitaler Form vorliegenden Pulscurven (relative Einheiten)
t	Zeit (sec) oder (msec)
u	Spannung (Volt)
V	Volumen (cm ³)
x	Länge (cm), Längskoordinate
z	als Index bedeutet "Zwischen-"
z'	allgemeiner Widerstand pro Längeneinheit
Z	Wellenwiderstand (dyn·sec/cm ⁵) bzw. (elektrisch) (Ohm)

Z_1, Z_2, Z_3 Wellenwiderstand des Hauptastes einer Wellenleitung
 Z_4 Wellenwiderstand eines Seitenastes

α Phasenmaß (1/cm)
 β Dämpfungsmaß (1/cm)
 δ Übertragungsmaß (1/cm)
 κ Volumenelastizitätsmodul (dyn/cm²)
 ρ Dichte (g/cm³)
 φ Winkel (Winkelgrade)
 ω Kreisfrequenz (1/sec)

I, II Bezeichnung für Seitenäste

Die im FORTRAN-Programm zur Berechnung eines Druck- oder Strompulses im theoretischen Schlauchmodell verwendeten Variablen und Felder sind im Programm (s. Anhang, S.I) erklärt.

Literatur

- ALEXANDER, R.S.: The genesis of the aortic standing wave.
Circulat. Res. 1, 145-151 (1953).
- AMLIKER, M., M.B. HISTAND, and E. OGDEN: Dispersion and attenuation of small artificial pressure waves in the canine aorta.
Circulat. Res. 23, 539-551 (1968).
- ATTINGER, E.O.: Pressure transmission in pulmonary arteries related to frequency and geometry. Circulat. Res. 12, 623-641 (1963).
- ATTINGER, E.O.: Flow patterns and vascular geometry. In: E.O. ATTINGER (Ed.), Pulsatile Blood Flow, pp. 179-200. McGraw-Hill Book Company, New York usw. 1964.
- BADER, H., und E. WETTERER: Frequenz und Wellenlänge stehender Schlauchwellen bei verschiedenen Größen des Abschlußwiderstandes.
Pflügers Arch. 268, 73-74 (1958).
- BAUER, R.D., Th. PASCH, and E. WETTERER: Theoretical studies on the human arterial pressure and flow pulse by means of a nonuniform tube model. J. Biomech. 6, 289-298 (1973).
- BLEICHERT, A., R. LEZGUS und F. MARTINI: Über die Länge der stehenden Welle in der Armarterie des Menschen. Z. Biol. 105, 141-156 (1952).
- BRECH, R., and B.J. BELLHOUSE: Flow in branching vessels.
Cardiovasc. Res. 7, 593-600 (1973).
- BUSSE, R., E. WETTERER, R.D. BAUER, Th. PASCH, and F. SUMMA:
The genesis of the pulse contours of the distal leg arteries in man. Pflügers Arch. 360, 63-79 (1975).
- FRANK, O.: Kritik der elastischen Manometer.
Z. Biol. 44, 445-613 (1903).
- FRY, D.L., and J.C. GREENFIELD, jr.: The mathematical approach to hemodynamics, with particular reference to Womersley's theory.
In: E.O. ATTINGER (Ed.), Pulsatile Blood Flow, pp. 85-99.
McGraw-Hill Book Company, New York usw. 1964.
- HARDUNG, V.: Zur mathematischen Behandlung der Dämpfung und Reflexion der Pulswellen. Arch. Kreisl-Forsch. 18, 167-172 (1952).
- HARDUNG, V.: Propagation of pulse waves in visco-elastic tubings.
In: Handbook of Physiology, Circulation, vol. I, pp. 107-135.
Washington 1962.

HARDUNG, V.: Input impedance and reflection of pulse waves.

In: E.O. ATTINGER (Ed.), Pulsatile Blood Flow, pp. 135-148.

McGraw-Hill Book Company, New York usw. 1964.

KAPAL, E., F. MARTINI und E. WETTERER: Über die Zuverlässigkeit der bisherigen Bestimmungsart der Pulswellengeschwindigkeit.

Z. Biol. 104, 75-86 (1951).

KENNEDY, J.H., D.W. WIETING, M.H.C. HWANG, M.S. ANDERSON, R.J. BAYARDO,

J.F. HOWELL, and M.E. DE BAKEY: Hydraulic and morphologic study of fibrous intimal hyperplasia in autogenous saphenous vein bypass grafts. J. Thorac. Cardiovasc. Surg. 67, 805-813 [1974].

KENNER, Th.: Flow and pressure in the arteries. In: Y.C. FUNG, N. PERONE, and M. ANLIKER (Eds.), Biomechanics. Its Foundations and Objectives, pp. 381-434. Englewood Cliffs 1972.

KENNER, Th., und E. WETTERER: Experimentelle Untersuchungen über die Pulsformen und Eigenschwingungen zweiteiliger Schlauchmodelle. Pflügers Arch. 275, 594-613 (1962).

KNOX, C.K., jr.: An experimental investigation of the steady flow of a viscous fluid in circular, branched tubes.

M.S. Thesis, University of Minnesota 1962.

KROVETZ, L.J., and W.J. CROWE: Studies of arterial branching in models using flow birefringence. Digest 7th Int. Conf. Med. Biol. Eng., p. 158, Stockholm 1967.

LANDES, G.: Studien zur Theorie des Blutdrucks und der Blutströmung in den Arterien. Z. Biol. 101, 1-20 (1942).

LING, S.C., H.B. APABEK, and J.J. CARMODI: Pulsatile flows in arteries..

In: M. HETÉNYI and W.G. VINCENTI (Eds.), Applied Mechanics.

Proc. 10th Int. Cong. Appl. Mech., pp. 277-291. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1969.

MARTIN, J.D.: Theoretical and experimental analysis of wave reflections in branched flexible conduits.

Ph.D. Thesis, University of Illinois 1966.

MCDONALD, D.A.: Blood flow in arteries. E. Arnold Publ., London 1960/74

MEIGNER, J.E., and J.W. REMINGTON: Pulse contour changes in carotid and foreleg arterial systems. Amer. J. Physiol. 202, 527-535 (1962).

- NEWMAN, D.L., R.G. GOSLING, N.L.R. BOWDEN, and D.H. KING: Pressure amplitude increase on unmatched the aortic-iliac junction of the dog. *Cardiovasc. Res.* 7, 6-13 (1973).
- NOORDERGRAAF, A.: Hemodynamics. In: H.F. SCHWAN (Ed.), *Biological Engineering*, pp. 691-745. McGraw-Hill Book Company, New York usw. 1969.
- REMINGTON, J.W.: Volume quantitation of the aortic pressure pulse. *Fed. Proc.* 11, 750-761 (1952).
- RÜDENBECK, M.: Zusammensetzung elektrischer Analogien mit hydrodynamischen Kreislaufgrößen. *Z. Kreisl.-Forsch.* 56, 351-359 (1967).
- RONNIGER, R.: Über eine Methode der übersichtlichen Darstellung hämodynamischer Zusammenhänge. *Arch. Kreisl.-Forsch.* 21, 127-160 (1954).
- SARPKYA, T.: Reflection and transmission of pulse waves in distensible bifurcating vessels. Digest 7th. Int. Conf. Med. Biol. Eng., p. 159, Stockholm 1967.
- SIPKEMA, P.: Reflection of pressure and flow waves in arteries. Diss. Amsterdam 1973.
- SNYDER, M.F., V.C. RIDEOUT, and R.J. HILLESTAD: Computer modeling of the human arterial tree. *J. Biomech.* 1, 341-353 (1968).
- STEBBENS, W.E.: Turbulence of blood flow. *Quart. J. Exp. Physiol.* 44, 110-117 (1959).
- TALUKDER, N.: Untersuchungen über die Strömung in arteriellen Verzweigungen. Diss. RWTH Aachen 1974.
- UNGER, H.G.: Theorie der Leitungen. Fried. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1967.
- VOGEL, S., H. WARNKE, J. BOHM und R. WIDERA: Untersuchungen zur Hämodynamik des aorto-koronaren Saphena-Bypass. *Z. Exper. Chirurg.* 8, 80-85 (1975).
- WETTERER, E.: Ältere und neuere Befunde über die diastole Schwingung des Arterienpulses. In: "Arthur Weber zum 90. Geburtstag". Vorträge von Trägern des Arthur-Weber-Preises, gehalten am 3. August 1969 in Bad Nauheim. Hrsgg. v. F. BÜCHNER. S. 69-78. Medizinische Schriften, Boehringer Mannheim.

- WETTERER, E., and H. SADEK: Über die Unterschiede zwischen Injektion- und Signalegeschwindigkeit bei der Fortleitung der wellenlänge stehender Schlauchwellen. *Pflügers Arch.* 270, 41-42 (1959).
- WETTERER, E., and Th. KEMER: Grundlagen der Dynamik des Arterienpulses. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1968.
- WOMERSLEY, J.R.: Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube. I. The linear approximation for long waves. *Phil. Mag.* 46, 199-221 (1955).
- WOMERSLEY, J.R.: An elastic tube theory of pulse transmission and oscillatory flow in mammalian arteries. Wright Air Develop. Center Techn. Rep., WADC-TR 56-614 (1957).
- ZELLER, H., N. TALUKDER, and G. LORENI: Model studies of pulsating flow in arterial branches and wave propagation in blood vessels. In: Fluid Dynamics of Blood Circulation and Respiratory Flow. Specialist Meeting, Naples 1960. Agard Conf. Proc. No. 65, 15-1 to 15-8. AGARD, Neuilly-sur-Seine.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. E. Wetterer für zahlreiche Anregungen zu dieser Arbeit sowie die unermüdliche Hilfsbereitschaft bei der Bewältigung aller anstehenden Probleme danken. Ferner möchte ich Herrn Prof. Dr. K.-F. Ebert für die gründliche Durchsicht des Manuskripts und für kritische Anmerkungen dazu danken.

Mein Dank gilt weiterhin meinem Kollegen Herrn Dr. R. Busse für viele wertvolle Diskussionen sowie Herrn K. Ostermeier und Herrn G. Siebenhaar für die große Geduld bei der Herstellung der Versuchsschläuche und der mechanischen Teile der Versuchsanordnung.

Diese Arbeit wurde am Institut für Physiologie und Kardiologie der Universität Erlangen-Nürnberg angefertigt.

Lebenslauf

5. Nov. 1940 geboren in Trumsdorf, Kreis Kulmbach, als Sohn des Pfarrers Leonhard Bauer und seiner Ehefrau Hildegard, geb. Gräter
- 1946-1950 Besuch der Volksschule in Kulmbach
- 1950-1959 Besuch der humanistischen Gymnasien in Kulmbach, Weilheim und Garmisch-Partenkirchen
- Juni 1959 Reifeprüfung in Garmisch-Partenkirchen
- 1959-1966 Studium der Physik an der Technischen Universität München
- 1964-1966 Diplomarbeit am Elektrophysikalischen Institut der Technischen Universität München
- 1966 Diplomhauptprüfung für Physiker
- 1966-1969 Tätigkeit im Grundlagenlabor und in der Patentabteilung der Fa. Grundig, Fürth
- ab April 1969 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Physiologie und Kardiologie der Universität Erlangen-Nürnberg
- April 1973 Ernennung zum Akademischen Rat
- 1973 Beginn der Arbeiten zur vorliegenden Dissertation
- Jan. 1975 Ernennung zum Akademischen Oberrat

Copy-Center 2000

852 ERLANGEN · Obere Karlstr. 30
Tel. 09131-26197